

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



Markéta Růžicková

**ZÁVISLOST DETEKCE PŘESTŘELUJÍCÍCH VRCHOLŮ
KONVEKTIVNÍCH BOUŘÍ NA ROZLIŠOVACÍ
SCHOPNOSTI DRUŽICE A ČASU SNÍMÁNÍ**

**INFLUENCE OF THE SATELLITE SPATIAL RESOLUTION AND SCAN
TIME ON CONVECTIVE STORMS' OVERSHOOTING TOPS DETECTION**

Diplomová práce

Praha 2009

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Martin Setvák, CSc.

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci s názvem „Závislost detekce přestřelujících vrcholů konvektivních bouří na rozlišovací schopnosti družice a času snímání“ vypracovala samostatně na základě vlastních zjištění a s použitím řádně citovaných pramenů a uvedených datových podkladů.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků práce mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze se souhlasem této univerzity.

Svoluji, aby byla práce zapůjčena ke studijním účelům, a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 15. 8. 2008

.....

Markéta Růžičková

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat RNDr. Martinu Setvákovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, jeho cenné rady a připomínky a věnovaný čas. Dík patří dále Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí satelitních snímků a v neposlední řadě firmě VCS za možnost práce s programem 2met!® Vision+, který je vhodný pro zpracování a vizualizaci dat ve formátu XPIF.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možnostmi družicové detekce tzv. přestřelujících vrcholů konvektivních bouří. Ty bývají charakteristické poměrně rychlým vývojem, velikostí v řádech několika kilometrů a jsou spojovány s nebezpečnými povětrnostními jevy. Na satelitních snímcích se mohou projevit výrazným teplotním minimem, záleží na času a periodicitě snímání určité družice a dalších jevech vyskytujících se na horní hranici oblačnosti bouře.

V práci je zkoumána časová variabilita minimálních teplot horní hranice oblačnosti vybraných bouří a to na základě dat z družic Meteosat druhé generace (MSG). Hlavní těžiště však spočívá ve vyhodnocení vlivu geometrické rozlišovací schopnosti operativních meteorologických družic na minimální detekovanou jasovou teplotu, která souvisí s výškou horní hranice oblačnosti. Pro tento účel byla zvolena data pořízená přístroji SEVIRI, AVHRR a MODIS. Jde převážně o konvektivní bouře, které se vyskytly nad Evropou v roce 2008. Při srovnání dat z družice MSG a polárních družic je dále uvažován rozdíl časů snímání, který by měl být co nejmenší.

Údaje o minimální teplotě horní hranice oblačnosti bouří se běžně používají pro potřeby meteorologického nowcastingu, tudíž je vhodné zhodnotit jejich reprezentativnost.

Klíčová slova:

konvektivní bouře, přestřelující vrchol, dálkový průzkum Země, jasová teplota

ABSTRACT

This paper deals with the possibilities of convective storms' overshooting tops detection as seen from satellites. These tops are characterized by a rapid development, their size is only a few kilometres in diameter and they are connected with the presence of hazardous weather. They can be identified as small clusters of very low temperatures in satellite imagery, but this nature depends on the scan time and the scan frequency of the specific satellite and on the other features presence at tops of convective storm.

The temporal variability of minimum IR brightness temperatures at the cloud tops of selected convective storms is studied in this paper, namely on the basis of the Meteosat Second Generation (MSG) satellite datasets. But the main emphasis of this work is to analyse the influence of the operative meteorological satellites' spatial resolution on the minimal IR brightness temperature, which is related to height of the cloud top. The datasets acquired by the sensors SEVIRI, AVHRR and MODIS have been chosen for these purposes. Mostly the convective storms that occurred over the Europe in the year 2008 have been diagnosed. The scan time difference must be taken into account when datasets from MSG and the other polar orbit satellites are compared and this difference should be minimal.

The minimum IR brightness temperature data are commonly used for purposes of meteorological nowcasting, that's why the evaluation whether they are representative is appropriate.

Key words:

convective storm, overshooting top, remote sensing, brightness temperature

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	10
1. ÚVOD	12
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	14
2.1 Družicová pozorování konvektivních bouří.....	14
2.2 Detekce jevů na HHO bouří na základě jasových teplot	15
2.3 Další monitoring konvektivních bouří a doprovodných jevů	18
3. KONVEKTIVNÍ BOUŘE.....	20
3.1 Základní terminologie.....	20
3.2 Vývoj a vzhled oblačnosti konvektivních bouří	21
3.3 Přestřelující vrcholy.....	24
4. DRUŽICOVÁ POZOROVÁNÍ KONVEKTIVNÍCH BOUŘÍ.....	27
4.1 Družice používané pro meteorologické účely.....	27
4.1.1 Družice MSG a radiometr SEVIRI.....	28
4.1.2 Systém družic na polární dráze NOAA	29
4.1.3 Družice MetOp	31
4.1.4 Radiometr MODIS družic Terra a Aqua	31
4.2 Multispektrální charakteristiky oblačnosti konvektivních bouří	32
4.2.1 Základy multispektrální interpretace	32
4.2.2 Vzhled konvekční oblačnosti na družicových snímcích.....	36
4.3 Možnosti detekce přestřelujících vrcholů	44
4.3.1 Identifikace vrcholů na základě jasové teploty.....	44
4.3.2 Další možnosti detekce přestřelujících vrcholů.....	48
5. METODIKA ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT	51
5.1 Použitá data a software	51
5.2 Korekce vstupních dat	54
5.2.1 Radiometrické korekce vstupních dat.....	54
5.2.2 Geometrická korekce vstupních dat	56
5.3 Detekce přestřelujících vrcholů	57
5.4 Čas snímání přestřelujících vrcholů.....	59
5.5 Shrnutí postupu práce	61
6. VÝSLEDKY	62
6.1 Vliv geometrické rozlišovací schopnosti družice na minimální detekovanou jasovou teplotu	62

6.2 Otázka časové variability minimálních teplot.....	67
7. DISKUZE	69
8. ZÁVĚR	73
SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ.....	75
Seznam použitých pramenů a literatury.....	75
Zdroje dat.....	79
Použitý software	79
SEZNAM PŘÍLOH	80

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BT	Brightness Temperature
BTD	Brightness Temperature Difference
CALIOP	Cloud Aerosol Lidar With Orthogonal Polarization
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
Cb	Cumulonimbus (bouřkový oblak, dešťová kupa)
CLASS	Comprehensive Large Array-data Stewardship System
CPR	Cloud Profiling Radar
CWA	Close-in Warm Area
CWS	Central Warm Spot
CZRAD	Česká meteorologická radarová síť
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DWA	Distant Warm Area
ENVI	Environment for Visualizing Images
EOS	Earth Observing System
EPS	EUMETSAT Polar System
EUMETCast	EUMETSAT Multicast Distribution System
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
GEO	Geostationary Earth Orbit
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HHO	horní hranice oblačnosti
HRIT	High Rate Information Transmission
HRPT	High Resolution Picture Transmission
HRV	High Resolution Visible
IDL	Interactive Data Language
IJPS	Initial Joint Polar-Orbiting Operational Satellite System
IR	infrared
LEO	Low Earth Orbit
LRIT	Low Rate Information Transmission
LSM	lower stratospheric moisture
MetOp	Meteorological Operational Polar Satellites of EUMETSAT
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	near infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWP	Numerical Weather Prediction
OT	Overshooting Top
POES	Polar Operational Environmental Satellite
PRT	Platinum Resistance Thermometer
RAD	radiance
REF	reflectance
RSS	Rapid Scanning Service
RTM	Radiative Transfer Model
SAFNWC	Satellite Applications Facility in Nowcasting
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SWIR	short wave infrared
TIROS	Television Infrared Observation Satellite
VIS	visible
VISSR	Visible and Infrared Spin Scan Radiometer
WV	water vapor
XPIF	Extended Processed Image File

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

OBRÁZKY:

<i>Obr. 3.1 Rozdíl mezi konvektivní bouří z pohledu družice MSG1 a radarů sítě CZRAD</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.2 Schematické znázornění vývojových stadií jednoduché cely dle C. A. Doswella</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3.3 Schematický řez konvektivní bouří.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.4 Výtok studeného vzduchu z konvektivní bouře a flanking line.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.5 Přestřelující vrcholy pozorované z letadel</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.1 Intenzita odraženého slunečního záření a tepelného záření v pásmu 3,5 až 4 μm</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.2 Vliv optické tloušťky HHO na průběh odrazivosti (R), propustnosti (T) a emisivity (T) pro sférické částice různých poloměrů pro vlnové délky 3,75 a 11 μm.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.3 Struktura HHO (přestřelující vrcholy, vlečka) konvektivních bouří.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.4 Dvojí možnost zobrazení družicových snímků v pásmu ~ 3,5 až 4,0 μm.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4.5 Příklady zvýšené odrazivosti (jádro bouře, vlečka) v pásmu ~ 3,5 až 4,0 μm</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4.6 Propustnost atmosféry a umístění IR a WV kanálů SEVIRI</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4.7 Rozdíl jasových teplot na snímcích pořízených v kanálech WV6.2 a WV7.3.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4.8 Vzhled bouře na snímku pořízeném v IR pásmu atmosférického okna</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4.9 Vzhled bouře v RGB kompozitu blížícímu se vnímání lidským okem (AVHRR).....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4.10 Vzhled bouře v RGB kompozitu blížícímu se vnímání lidským okem (SEVIRI)</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4.11 24-hodinový mikrofyzikální produkt</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4.12 Noční a denní mikrofyzikální produkt.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4.13 Konvektivní bouře zobrazené v RGB kompozici „Storm“</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4.14 Vzhled bouře v tepelném snímku s barevně zvýrazněnou teplotní škálou.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4.15 Vzhled bouře v tepelném snímku se zvýrazněnými škálami CC a JJ (NOAA)</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4.16 Vzhled bouře v tepelném snímku – roztážení histogramu pomocí Gaussovo funkce</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4.17 Vzhled bouří se studeným prstencem a studeným U/V v tepelném snímku</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4.18 Série snímků v tepelném pásmu zachycující vývoj přestřelujících vrcholů</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4.19 Přestřelující vrcholy na snímku v tepelném pásmu a odpovídající rozdíl BTd.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4.20 Detekce přestřelujících vrcholů dle metody „IRW-texture“ (Bedka et al., 2010)....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4.21 OT bouří na snímku v tepelném pásmu a odpovídající RGB kombinace „Storm“ ...</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.21 Snímek okrajové části kovadliny bouře pořízený přístrojem CPR (CloudSat)</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5.1 Příklad zpracování snímků v programu 2met!® Vision+.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.2 Příklad výstupu v software HRPT Reader</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.3 Paralaxa</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 5.4 Využití radiolokačních odrazivostí pro identifikaci přestřelujících vrcholů</i>	<i>58</i>

<i>Obr. 5.5 Srovnání možnosti identifikace OTs v tepelném a viditelném pásmu (HRV).....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 5.6 Další použitelné metody pro detekci přestřelujících vrcholů</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 5.7 Vliv geometrického rozlišení přístroje na detekci přestřelujících vrcholů</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 6.1 Přibližná poloha detekovaných přestřelujících vrcholů ze dne 19. 5. 2008</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 6.2 Závislost průměrné hodnoty difference minimálních detekovaných jasových teplot na rozdílu časů snímání (kategorie po 10 s)</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 6.3 Závislost průměrné difference pozorovaných teplotních minim na rozdílu časů snímání (odlišnost časů maximálně o danou hodnotu).....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 6.4 Časová proměnlivost minimálních jasových teplot OTs vybraných bouří.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6.5 Geografická poloha OTs, u nichž byla sledována variabilita teplotních minim</i>	<i>68</i>

TABULKY:

<i>Tab. 4.1 Seznam spektrálních kanálů přístroje SEVIRI.....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 4.2 Parametry drah jednotlivých operativních družic NOAA.....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 4.3 Spektrální kanály přístroje AVHRR/3</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4.4 Přehled spektrálních kanálů přístroje MODIS</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4.5 Spektrální kanály radiometrů některých družic používané pro monitoring bouří.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4.6 Zvýraznění obrazu doporučené pro 24-hodinový mikrofyzikální RGB produkt</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4.7 Škály teplot a zvýraznění obrazu v RGB produktu „Storm“</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5.1 Konvektivní bouře zpracováváné v rámci této práce.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 6.1 Charakteristiky přestřelujících vrcholů konvektivních bouří ze dne 19. 5. 2008.....</i>	<i>63</i>

1. ÚVOD

Konvektivní bouře (*convective storms*) představují jeden z velmi nebezpečných přírodních fenoménů. Mezi jevy s nimi spojené patří přívalové deště, kroupy, následné bleskové povodně, silný nárazovitý vítr, downbursty, tornáda či elektrická aktivita. Tzv. přestřelující vrcholy (*overshooting tops*, OT) konvektivních bouří jsou jednou z charakteristik horní hranice oblačnosti (HHO), která vypovídá o intenzitě dané bouře.

Vnitřní struktura a dynamika konvektivních bouří byla během několika posledních desetiletí zkoumána hlavně prostřednictvím meteorologických radarů. Radarová pozorování však nejsou všude na Zemi dostupná, nebo nejsou na dostatečně vysoké úrovni. Oproti tomu operativní meteorologické družice umožňují pohled shora, na základě satelitních snímků jsou sledovány a analyzovány charakteristiky horní hranice oblačnosti bouří. Tyto charakteristiky jsou výsledkem vnitřních procesů a interakcí, které probíhají v prostředí dané bouře, proto také zčásti vypovídají o potenciální nebezpečnosti a charakteru bouře.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit závislost detekce přestřelujících vrcholů konvektivních bouří na geometrické rozlišovací schopnosti zařízení nesených operativními meteorologickými družicemi. Přestřelující vrcholy mají v průměru pouhých několik kilometrů, na družicových snímcích tedy zauímají velikost od jednoho do několika desítek pixelů. Čím je bouře intenzivnější, tím se projevuje vyšším přestřelujícím vrcholem, resp. jejich sérií. Porovnávána jsou především data pořízená přístrojem SEVIRI (Meteosat druhé generace, MSG) s daty z radiometrů AVHRR (družice NOAA/POES a MetOp) a MODIS (družice EOS Terra a Aqua). Zkoumány jsou konvektivní bouře, které se vyskytly nad Evropou v roce 2008 a jeden ukázkový případ silné konvekce z roku 2009. Při analýze je dbáno na to, aby byl rozdíl časů snímání co nejmenší.

Vliv geometrické rozlišovací schopnosti je hodnocen vzhledem k minimální detekované jasové teplotě v pásmu tepelného záření atmosférického okna, což v tomto případě odpovídá vlnovým délkám $\sim 11 \mu\text{m}$. Jasová teplota horní hranice oblačnosti je od počátku družicové meteorologie jednou ze zásadních informací, která vypovídá o výšce horní hranice oblačnosti. Výraznými teplotními minimy se na snímcích většinou projevují právě přestřelující vrcholy. Záleží však na času a frekvenci snímání družice vzhledem k vývojovému stadiu určitého přestřelujícího vrcholu, na ostatních

jevech a charakteristikách vyskytujících se na horní hladině oblačnosti konvektivní bouře a výrazně také na geometrickém rozlišení příslušného radiometru. Údaje o horní hranici oblačnosti bouří se používají pro potřeby meteorologického nowcastingu¹, tudíž je vhodné posoudit jejich reprezentativnost.

Práce je rozčleněna do několika hlavních částí. Nejprve je podán přehled o vývoji a současném stavu družicových i jiných pozorování konvektivních bouří, jejich charakteristik a doprovodných jevů. Studií zaměřených přímo na vliv prostorového rozlišení družice na detekci přestřelujících vrcholů se však vyskytuje minimum. Další kapitola se zabývá podrobným popisem vývoje a morfologií HHO konvektivních bouří a charakteristikou přestřelujících vrcholů. V následující části jsou nejprve popsány kategorie meteorologických družic včetně jejich přístrojového vybavení a v dalším textu rozebrány multispektrální charakteristiky konvektivních bouří a některé z algoritmů vyvinutých pro detekci přestřelujících vrcholů i s názornými příklady.

Po teoretické části následuje rozbor použité metodiky a vlastní zpracování archivních dat. K tomu byly využity standardní nástroje a software pro zobrazování a zpracování družicových dat jako *HRPT Reader* (David Taylor), *2met!® Vision+* (VCS) či *IDL/ENVI*. Data byla převedena na jasovou teplotu, detekovány významné přestřelující vrcholy a odečten, případně vypočítán čas jejich snímání. K výsledkům práce patří nejen srovnání minimálních detekovaných jasových teplot přestřelujících vrcholů vzhledem ke geometrické rozlišovací schopnosti jednotlivých družic, ale je zkoumána i jejich časová variabilita.

V diskuzi jsou pak popsány možné nedostatky použité metodiky a problémy týkající se interpretace pole jasové teploty HHO konvektivních bouří. V neposlední řadě jsou diskutovány ostatní druhy dat, které by byly použitelné pro srovnání dosažených výsledků, avšak nebyly autorce práce k dispozici.

¹ *Termín, označující detailní analýzu aktuální situace, zpravidla založenou na prostředcích distančního snímání, a následnou velmi krátkodobou předpověď, zpravidla na 2 až 6 hodin dopředu, dle typu sledovaného meteorologického jevu.*

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Družicová pozorování konvektivních bouří

Meteorologické družice reprezentují již od počátku 60. let 20. století, kdy byla vypuštěna první experimentální družice TIROS-1, jeden z nejdůležitějších zdrojů informací moderní meteorologie. Tato informace je nejen velkoplošná a spojitá, ale v případě geostacionárních meteorologických družic také relativně časově souvislá. Proto se meteorologické družice staly spolu s radarovou informací hlavním prostředkem pro pozorování i velmi krátké předpovědi (*nowcasting*) extrémních jevů, mezi něž patří také konvektivní bouře.

V počátcích se družicová meteorologie zaměřila především na identifikaci oblačných systémů. Monitoring konvektivních bouří a jejich charakteristik na satelitních snímcích se postupně vyvíjel s nástupem nových družic a jejich přístrojovým vybavením. U operativních meteorologických družic vzrostl počet spektrálních kanálů, došlo k vývoji kalibrace systémů a zlepšila se geometrická rozlišovací schopnost přístrojů, jako třeba v případě družic Meteosat první generace a novějších MSG (Setvák, 2002; http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites). Vysokým počtem kanálů, z nichž velká část je vhodná rovněž pro studium horní hranice oblačnosti (HHO), i vyšší rozlišovací schopností disponuje například zařízení MODIS (družice Aqua a Terra). Jeho přínos pro studium silných konvektivních bouří je popsán v článku Setvák et al. (2007).

Pozornost se postupně přesunula k detailnějšímu popisu morfologie oblačnosti a jejich multispektrálních vlastností. Ve viditelném a blízkém infračerveném spektru je možné zachytit texturu horní hranice oblačnosti bouří, tím pádem identifikovat jednotlivé přestřelující vrcholy, částečně transparentní oblast kovanliny bouře nebo další jevy jako jsou tzv. vlečky (*plumes*). Mikrofyzikální vlastnosti HHO konvektivních bouří, tedy velikost, tvar a koncentrace ledových krystalů, jsou zkoumány především v blízkém IR pásmu ($\sim 3,5 - 4 \mu\text{m}$). Tímto způsobem byly objeveny výše zmíněné vlečky, jimiž se detailně zabývají například Levizzani, Setvák, (1996), Melani et al. (2003), Setvák et al. (2003), či Wang (2003).

Pole jasové teploty (*brightness temperature*, BT) HHO včetně gradientů a minimálních hodnot bývá nejčastěji zachyceno v termálním pásmu klasického

atmosférického okna („*split window*“) odpovídajícímu vlnovým délkám 10 – 13 μm . Již od počátků družicové meteorologie je tato informace považována za jednu z hlavních ve vztahu k výšce horní hranice oblačnosti, kdy se předpokládá teplotní rovnováha mezi HHO a okolním prostředím. Stačí tedy nalézt hladinu, ve které teplota prostředí zjištěná např. sondáží či pomocí modelů numerické předpovědi počasí (NWP) odpovídá teplotě HHO. To platí pro opticky hustou, nepropustnou oblačnost centrálních oblastí konvektivních bouří. Metoda selhává pro částečně transparentní oblačnost, určité zpřesnění spočívá v zahrnutí více spektrálních kanálů a to těch v oblasti atmosférických oken i kanálů absorpce vodní páry či CO_2 (Menzel, 2001; EUMETSAT, 2007). Přestřelující vrcholy jsou pak jedním ze specifických případů popsanych v dalším textu.

2.2 Detekce jevů na HHO bouří na základě jasových teplot

Autoři zabývající se problematikou konvektivních bouří se zaměřují na popis určitých jevů a struktur HHO bouří pozorovaných meteorologickými družicemi a snaží se vysvětlit jejich vznik. Jedná se zejména o interpretaci pole jasových teplot vzhledem k výšce HHO v případech, kdy konvektivní bouře proniká tropopauzou do teplejší spodní stratosféry. Koncem 70. let byla prvně dokumentována pomocí satelitů GOES bouře vyznačující se studeným prstencem s teplým středem uvnitř (*central warm spot*, CWS) (Mills, Astling, 1977) označovaná jako *cold-ring shaped storm*. S nástupem družic MSG byly tyto studené prstence pozorovány častěji i v Evropě, příkladem je silná bouře z 25. června 2006 vyskytující se na jihu Čech (Setvák et al., 2008a; Štáštka, Setvák, 2008). Mechanismus vzniku jevu není zatím zcela potvrzen, možné interpretace lze najít např. v Řezáčová et al. (2007) či Setvák et al. (2008b).

Studené prstence jsou někdy dávány do souvislosti s dalším jevem detekovaným na HHO bouře, který může mít podobnou příčinu vzniku. Úkaz byl dříve označován jako „zvýrazněné V“ (*enhanced-V*), v současnosti spíše jako „studené U“ (nebo „V“, *cold-U/V*) (Setvák et al., 2008). Tento fenomén je znám od počátku 80. let, kdy byl dokumentován a analyzován v rámci mnoha prací (McCann, 1983; Fujita, 1982; Negri, 1982). Následně se autoři studií zaměřili na příčiny vzniku jevu a teplých oblastí CWA (*close-in warm area*) a DWA (*distant warm area*), které obklopuje, na kvantitativní popis jevu a jeho spojitost s intenzitou bouře a porovnání pozorování v IR oblasti se stereoskopickými metodami (např. Adler et al., 1985; Hasler, 1981; Heymsfield, Blackmer, 1988; Heymsfield et al., 1991). V nedávné době došlo k oživení

problematiky v souvislosti se studiem vleček (Wang, 2007; Setvák et al., 2007), Brunner et al. (2007) se například zabýval objektivní detekcí tohoto fenoménu pro potřeby nowcastingu.

Identifikace přestřelujících vrcholů v družicových snímcích na základě jasové teploty může být pro výše uvedené kategorie bouří poměrně znesnadněna, nebo není možná (Štástka, Setvák, 2008). V tepelných pásmech atmosférického okna (pro potřeby této práce použity spektrální kanály jednotlivých družic $\sim 11 \mu\text{m}$) se totiž přestřelující vrcholy většinou projevují jako shluky velice chladných pixelů. To je způsobeno faktem, že se při výstupu vzduchu nad okolní HHO nadále přibližně nasyceně adiabaticky ochlazují o $7 - 9 \text{ K.km}^{-1}$ (Negri, 1982), zatímco kováldina je obklopující má teploty odpovídající teplotě tropopausy, či jiné rovnovážné hladiny (Adler et al., 1985). Tento rozdíl může činit $15 - 20 \text{ K}$ (Setvák et al., 2008). Detekce přestřelujících vrcholů a interpretace jejich výšky vůči okolí závisí také na času a frekvenci snímání družice vzhledem k jejich vývojovému stadiu.

Kromě identifikace tohoto jevu pomocí minimální jasové teploty na snímcích z jednoho kanálu byly různými autory vyvinuty další metody jejich detekce. Mezi nejznámější patří tzv. *brithness temperature difference* (BTD), kdy je počítán rozdíl v jasové teplotě mezi pásmy vodní absorpce ($\sim 7 \mu\text{m}$) a atmosférického okna ($\sim 11 \mu\text{m}$). Přestřelující vrcholy by měly vykazovat nejvyšší kladné rozdíly. Vysvětlení příčin, včetně možných nedostatků a případů, kdy algoritmus selhává, je možné najít v rozsáhlé literatuře (Fritz, Laszlo, 1993; Ackerman, 1996; Schmetz et al., 1997; Setvák et al., 2007). V návodu EUMETSATU na interpretaci jednotlivých kanálů SEVIRI a jejich RGB kombinací (EUMETSAT, 2006) je jako vhodný pro identifikaci přestřelujících vrcholů uveden i rozdíl obou kanálů vodní absorpce WV 6.2 – WV 7.3.

Další autoři kombinují odrazivost ve viditelném a blízkém IR pásmu spolu s jasovou teplotou v pásmu atmosférického okna a výše zmíněný rozdíl BTD (Berendes et al., 2008), jiní se zaměřují na výpočty gradientů BT (Brunner et al., 2007; Bedka et al., 2010). Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) vytváří kromě jiných denní operativní produkt s názvem „Storm“ (EUMETSAT, 2006). Zde jsou zvýrazněny vrcholy bouřkových oblaků s drobnými ledovými částicemi, což může značit intenzivnější updrafty v oblaku, které souvisejí s přestřelujícími vrcholy (Novák, Setvák, 2008). Blíže se identifikací tohoto jevu na družicových snímcích i konkrétními případy zabývají kapitoly 4 a 5.

Studií zaměřených na vliv geometrické rozlišovací schopnosti družice na detekci minimálních jasových teplot spojených s přestřelujícími vrcholy bylo doposud vypracováno malé množství (např. Setvák, Levizzani, 1992; Negri, 1982). Přitom tento faktor může vzhledem k rozměru přestřelujících vrcholů poměrně značně zkreslit nejnižší dosažené teploty. U snímků z geostacionárních družic dochází kvůli nižšímu prostorovému rozlišení k výraznějšímu vyhlazení pole minimálních jasových teplot, na snímcích z polárních družic (disponujících přístroji s lepším rozlišením) se proto vyskytují teplotní minima o několik stupňů chladnější.

Setvák a Levizzani (1992) porovnávali data pořízená v termálních kanálech přístroji AVHRR/NOAA a VISSR/METEOSAT (první generace). Prostorové rozlišení výše uvedených přístrojů se liší od 1,1x1,1 km (AVHRR) do 5x7 až 6x9 km (VISSR) pro oblast Evropy. Zároveň bylo simulováno na základě snímků NOAA rozlišení družice METEOSAT a tehdy ještě nevypuštěné družice MSG, aby se poukázalo na přínos budoucích senzorů pro monitorování a nowcasting konvektivních bouří. Pro srovnání byly vybrány pouze tři případy bouří, výsledné rozdíly minimálních jasových teplot se pohybovaly mezi 6,5 – 7,5 K. Zároveň došli autoři článku k závěru, že rozdíl přibližně 4 K může být na základě simulací nižšího rozlišení připsán rozdílným způsobům kalibrace srovnávaných přístrojů, zbytek difference souvisí s různou geometrickou rozlišovací schopností.

Negri (1982) zkoumal silné tornadické konvektivní bouře vyskytnuvší se nad Spojenými státy americkými v dubnu 1979. Při srovnání snímků z družic NOAA (rozlišení ~ 1 km²) a GOES (rozlišení ~ 100 km²) identifikoval rozdíly v minimálních teplotách okolo 10 K, pro vývojově mladé konvektivní bouře tento rozdíl činil až 20 K. Podobně jako autoři předchozího článku přisuzuje hodnoty okolo 4 K odlišným způsobům kalibrace přístrojů.

Z výše uvedených prací vyplývá, že se detekovaná teplotní minima mohou na základě geometrické rozlišovací schopnosti přístrojového vybavení jednotlivých satelitů výrazně lišit. Údaje o výšce HHO, která s minimální detekovanou jasovou teplotou souvisí, bývají využívány v meteorologických předpovědích a hlavně v civilním letectví. Malý počet studií zabývajících se danou problematikou byl též jednou z příčin sepsání této práce. Je pravděpodobné, že na použitých snímcích družice MSG se nebudou vyskytovat tak vysoké rozdíly v teplotních minimech oproti datům pořízeným družicemi polárními. Díky aplikaci snímků MSG RSS (tzv. *rapid-scan* režim)

s periodicitou snímání 5 minut je navíc možné porovnávat tato pozorování přestřelujících vrcholů s daty z polárních družic, která se nebudou příliš lišit v čase jejich snímání.

2.3 Další monitoring konvektivních bouří a doprovodných jevů

Konvektivní bouře a přestřelující vrcholy jsou zkoumány i pomocí jiných metod. Mezi nejběžnější z nich patří meteorologická pozemní radarová pozorování, která jsou schopna zachytit hlavně vnitřní strukturu dané bouře. V ČHMÚ byly do zpracování radarových dat z České meteorologické radarové sítě CZRAD zařazeny dva algoritmy COTREC a CELLTRACK orientované na identifikaci, sledování a předpověď pohybu bouřkových jader (Kyznarová, Novák, 2008). Přestřelující vrcholy v mnohých případech přesahují hladinu 14 km, která představuje horní limit používaný operativně v síti CZRAD i dalších evropských radarových sítích. Vyskytují se však studie, kdy bylo radarové echo experimentálně zpracováno až do výšky 20 km (Setvák et al., 2008a). Určité jevy na HHO bouří pozorované na družicových snímcích jsou také často studovány v souvislosti s vnitřní strukturou bouří zachycenou radary (např. Negri, 1982; Setvák et al., 2007).

Mezi další techniky, které bývají používány pro určení výšek HHO bouří a lepší porozumění charakteristikám přestřelujících vrcholů na družicových snímcích, se řadí například numerické modelování, letecké snímání či lidary. Pomocí numerických předpovědních modelů (NWP) a aerologických sondáží atmosféry je možné určit nejruznější indexy instability, vertikální profily teploty a vlhkosti a na jejich základě vůbec předpovědět vznik konvekce či stanovit teplotu tropopausy a výšku kovádky bouře. Výšku přestřelujících vrcholů nad okolní kovádkou zjišťovali pomocí leteckého laserového skenování Heymsfield et al. (1991), na základě pořízených leteckých fotografií např. Shenk in Bedka et al. (2010).

Aktivní mikrovlnné přístroje na meteorologických družicích mají v současné době spíše experimentální charakter. Nedávno vypuštěné družice CloudSat (nesoucí *Cloud Profiling Radar* CPR - 94 GHz radar) a CALIPSO (lidar CALIOP, *Cloud Aerosol Lidar With Orthogonal Polarization*) mohou v kombinaci s klasickými družicovými daty významně přispět k porozumění vnitřní struktury bouří, a to díky pozorováním jejich vnitřní struktury družicí CloudSat, resp. mikrofyzikálního složení

HHO bouří družicí CALIPSO. Dále mohou být data z těchto družic využita pro verifikaci detekce přestřelujících vrcholů na základě výše zmíněných algoritmů (Bedka et al., 2010). Vzhledem ke geometrickému rozlišení přístrojů (lidar 1 km, CPR 1,4 x 1,7 km) a schopnosti zachytit i malé oblačné částice je možné poměrně přesně určit výšku horní hranice oblačnosti bouře. Bližší informace o těchto systémech jsou na stránkách NASA (<http://www.nasa.gov/missions/current/>).

S konvektivními bouřemi souvisí celá řada nebezpečných forem doprovodného počasí. Intenzita bouře a některé z těchto jevů bývají dávány do souvislostí právě s přestřelujícími vrcholy či výskytem bouří se studenými prstenci a studenými U/V. Výzkum silných bouří proto může být orientován na škody způsobené doprovodnými jevy. Systémy detekce a lokalizace blesků souvisejících s bouřkovou oblačností se staly standardním nástrojem meteorologických pracovišť, statistiky bleskových výbojů v České republice a aktuální data je možné shlédnout na stránkách ČHMÚ (<http://www.chmi.cz/meteo/rad/blesk/>). Přestřelující vrcholy často generují zvýšené míry turbulentního proudění a to i ve velkých vzdálenostech (Heymsfield et al., 2001; Bedka et al., 2010), což představuje ohrožení hlavně pro letecký provoz. Nebezpečné povětrnostní jevy jako downbursty a tornáda jsou rovněž monitorovány a to buď meteorologickými službami, či entuziasty z řad „poučené laické veřejnosti“. Přehled významných konvektivních jevů na území ČR podává např. Volný et al. (2008), podrobné analýzy jednotlivých případů lze nalézt na stránkách ČHMÚ (<http://www.chmi.cz/torn/>) nebo Amateur Stormchasing Society (<http://www.bourky.com/index.php>).

3. KONVEKTIVNÍ BOUŘE

3.1 Základní terminologie

Konvektivní bouře (někdy také konvekční bouře, *convective storm*) je obecný termín pro souhrn konvektivních procesů a jevů, které probíhají při vývoji vertikálně mohutných, srážkových konvekčních oblaků druhu *cumulonimbus* (Cb), zahrnuje ale také různé druhy doprovodného počasí, jako jsou přivalové srážky, elektrická aktivita, silný nárazovitý vítr či například tornádo (Řezáčová et al., 2007). Silná případně nebezpečná konvektivní bouře (*severe convective storm*) je pak takovou bouří, která splňuje určitá kritéria pro toto označení. Ta ale nejsou celosvětově stanovena a závisí spíše na geografické oblasti nebo autorovi, jde tedy jen o kvalitativní vyjádření stavu určité bouře. Například dle meteorologické služby USA (*U.S. National Weather Service*) jsou tato kritéria určena následovně:

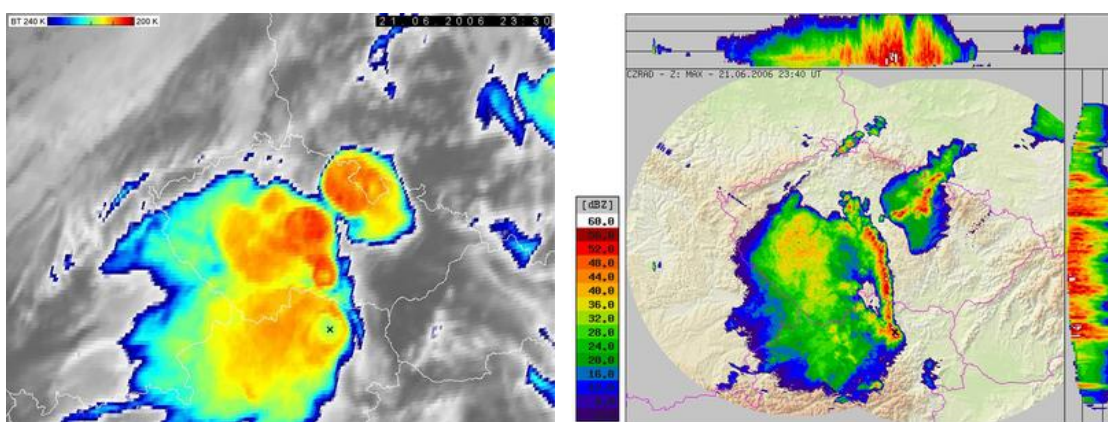
- výskyt tornáda
- nárazy větru větší nebo rovny 50 uzlům ($\sim 25 \text{ m.s}^{-1}$)
- výskyt krup o průměru větším nebo rovném $\frac{3}{4}$ palce ($\sim 2 \text{ cm}$)

Základem každé konvektivní bouře je tzv. konvekční cela (někdy také konvekční buňka, resp. bouřková buňka) obsahující oblast vzestupného proudu (*updraft*) a následné kompenzační sestupné proudění (*downdraft*). Rozlišujeme různé kategorie konvektivních bouří, nejpoužívanější klasifikace vychází z radarových pozorování a odvíjí se dle počtu a struktury konvekčních buněk, které jsou charakteristické zvýšenými radarovými odrazivostmi. Jednotlivé třídy se mezi sebou liší výskytem a intenzitou doprovodných jevů, z hlediska srážkového pak vydatností úhrnů, délkou životního cyklu i ovlivněným územím. Většinu bouří je možné v průběhu jejich života zařadit do více kategorií, jelikož prochází různými vývojovými stadii.

Jednoduché cely mají obvykle životní cyklus maximálně jednu hodinu, neprodukují v porovnání s ostatními kategoriemi silné srážkové úhrny, plošný rozsah je okolo 5-10 km. Multicely (typy *multicell cluster*, *squall line*) tvoří uspořádané soustavy cel z hlediska prostorové organizace, vývoje i doby trvání, vliv na délku života má především charakter vertikálního střihu větru (tj. změna rychlosti a směru větru s výškou). Supercely jsou zpravidla neobvykle silné a dlouho trvající konvektivní bouře

s výskytem tzv. mezocyklóny (*mesocyclone*, rotující jádro bouře spojené s *updraftem*), které mohou regenerovat. Mezocyklóna podporuje organizaci, trvání a intenzitu dané bouře. Tyto případy bývají doprovázeny extrémním počasím, avšak multiceklární systémy se mohou projevit stejně intenzivně, eventuálně zanechat horší následky než supercela.

V případě družicového pozorování je nutné si uvědomit, že je pozorována pouze HHO bouří, nikoliv jejich vnitřek. Jednotlivé bouřkové cely detekované radarem se tak mohou v případě družicových dat jevit jako jedna rozsáhlá bouře se společnou kovadlinou, jak je ukázáno na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Rozdíl mezi konvektivní bouří z pohledu družice MSG1 a radarů sítě CZRAD

(Bouře z 21. 6. 2006. Vlevo: kanál IR10.8, 23:30 UTC. Vpravo: 23:40 UTC; zdroj: Řezáčová et al., 2007)

3.2 Vývoj a vzhled oblačnosti konvektivních bouří

Na počátku vývoje bouřkových oblaků dochází ve výstupném proudu (*updraft*) ke vzniku a růstu vodních kapek, ve vyšších hladinách nad nulovou izotermou ledových krystalů. Pro výstup vzduchu je nutná existence určitého spouštěcího procesu, vzduch stoupající vzhůru musí být dostatečně teplý a vlhký, aby byl zajištěn přísun vody potřebné pro vznik oblaku, a mimoto vertikální profily teploty a vlhkosti musí podporovat další vertikální zrychlení vzduchové částice (Novák, Setvák, 2008). Při následném růstu oblaku dochází k nasávání okolního vzduchu, který se mísí se vzduchem vystupujícím, vodní pára postupně kondenzuje. Dosáhnou-li kapky nebo ledové krystalky určité velikosti, začínají padat jako srážkové částice, strhávají okolní vzduch a postupně se vypařují. Tím dochází k ochlazení klesajícího vzduchu a vzniká sestupný proud (*downdraft*), který dosahuje zemského povrchu, podél něho se roztéká

a může přerušit proud teplého a vlhkého vzduchu vtékajícího do updraftu (Řezáčová et al., 2007). Jednoduchá cela se postupně rozpadá a zůstává jen nesrážkový zbytek ledové kovadliny. Vývojová stadia jsou znázorněna na následujícím obrázku 3.2.

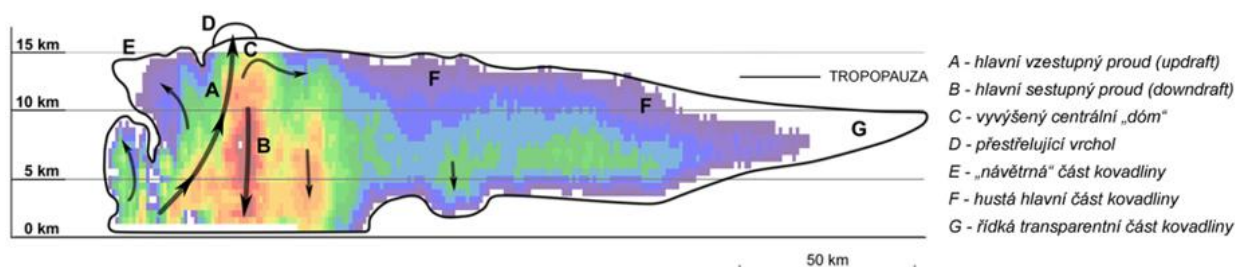


Obr. 3.2 Schematické znázornění vývojových stadií jednoduché cely dle C. A. Doswella
(zdroj: Řezáčová et al., 2007)

V prostředí se silnějším vertikálním stříhem větru a vysokou energií instability dochází k vývoji hluboké konvekce nebo organizovanějších konvekčních struktur. Výstupný proud, který dosahuje rychlostí řádové velikosti 10 m.s^{-1} (Řezáčová et al., 2007), prostupuje až do nejvyšších partií konvektivní bouře. Jelikož si i ve vyšších hladinách zachovává dostatečnou kinetickou energii, proniká skrz rovnovážnou hladinu horní hranice oblačnosti bouře (*cloud top equilibrium level*), obvykle skrz tropopauzu do spodní stratosféry. Zde vytváří vyvýšený výčnělek či dóm označovaný jako přestřelující vrchol (*overshooting top, penetrating tower*), který po určité době, kdy již nedisponuje žádnou kinetickou energií, klesá dolů a postupně se ustálí v rovnovážné hladině HHO bouře. Na jeho místě, či v blízkém okolí, což záleží na vnitřním uspořádání dané bouře, se postupně objevují další přestřelující vrcholy. Dochází tedy k periodickým pulsacím a vzniku turbulentního proudění. Základní jevy a procesy související s oblačností konvektivních bouří jsou patrné z obrázku 3.3.

V centrální části bouří se po určité době může vytvořit vyvýšený dóm, který obklopuje přestřelující vrcholy a je posunut ve směru proudění. Roztékáním výstupujícího vzduchu z centra bouře do jejího okolí postupně vzniká kovadlina bouře. Na její tvar má vliv rovněž výškové proudění, bývá protažena po jeho směru. Kovadliny dosahují rozměrů desítek, někdy až stovek kilometrů, horní hranice oblačnosti ve vzdálenějších částech od středu nabývá vrstevnatého charakteru. Oblačnost v jejím centru je opticky hustá, směrem k okrajům se stává propustnější. Částečně transparentní

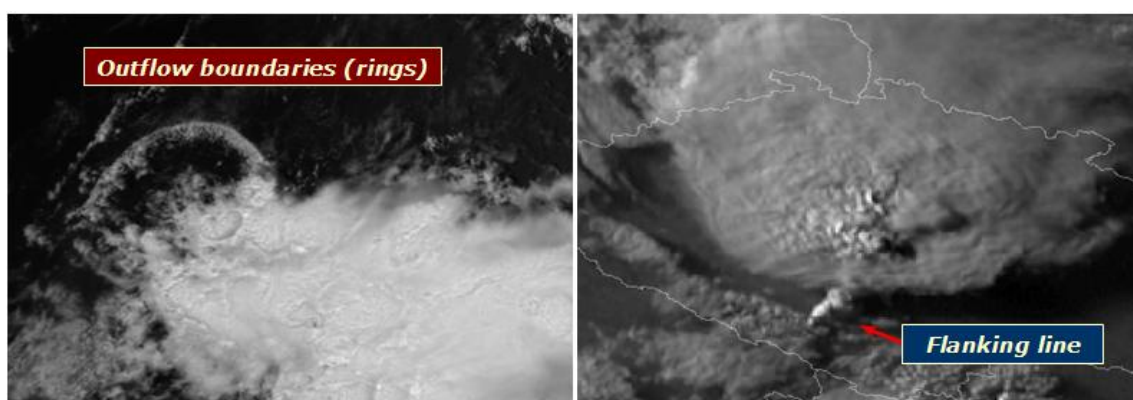
oblačnost v těchto částech kovadlin se pak na termálních snímcích jeví teplejší, než by odpovídalo skutečné výšce její horní hranice. V některých případech může mít oblačnost kovadlin na družicových snímcích pořízených ve viditelném spektru vzhled spirály, který souvisí s anticyklonální rotací na úrovni HHO (Řezáčová et al., 2007).



Obr. 3.3 Schematický řez konvektivní bouří

(zdroj: Novák, Setvák, 2008)

Další vizuální charakteristiky konvektivních bouří se nacházejí v nižších hladinách a při zemském povrchu, na družicových snímcích tyto jevy tudíž není možné až na výjimky pozorovat. Hlavními nebezpečnými jevy, které doprovázejí konvektivní bouře, jsou silný přívalový déšť a krupobití. Ty se však tvoří v podstatně menší oblasti než je prostor zaujímaný oblačným systémem bouře. Hlavně v případě supercelárních bouří je část základny beze srážek a zahrnuje oblast rotující oblačnosti (*wall cloud*) vystupující se základny oblaku směrem dolů, v níž může dojít k vývoji tornáda.



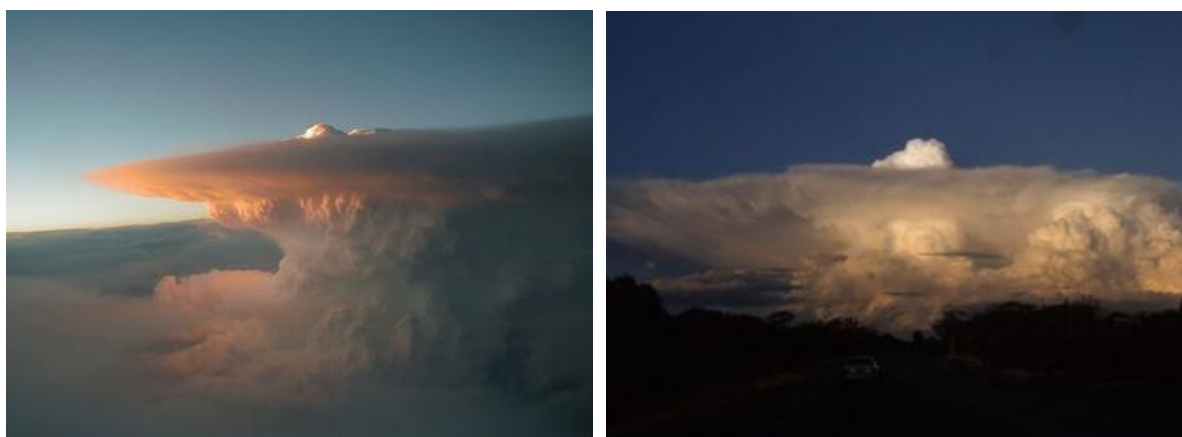
Obr. 3.4 Výtok studeného vzduchu z konvektivní bouře a flanking line

(Vlevo: MODIS Aqua, 15. 7. 2006, 02:45 UTC (kanál 1), Pacifik. Vpravo: MSG-2, 19. 7. 2007, 17:30 UTC (HRV), ČR; zdroj: Novák, Setvák, 2008)

Prudké výlevy studeného vzduchu z bouře (*downburst* a *microburst*), který se roztéká po povrchu, mohou zasáhnout mimo prostor oblačnosti bouře, obr. 3.4. Na jejich čele, tzv. gust frontě (*cold outflow boundary*, *gust front*) vzniká mělká konvekční oblačnost. Tato čela se projevují silnými nárazy větru a mohou mít neočekávané ničivé lokální účinky. Dalším jevem, který může být pozorovatelný na družicových snímcích (obr. 3.4) je pás oblačnosti na boku bouře (*flanking line*).

3.3 Přestřelující vrcholy

Dle meteorologického slovníku American Meteorological Society jsou přestřelující vrcholy definovány jako „kupolovité výčnělky nad kovanou bouřkového oblaku, které představují proniknutí výstupného proudu nad rovnovážnou hladinu“ (Bedka et al., 2010). Avšak pro to, aby byl jev klasifikován jako přestřelující vrchol, nebyly dosud stanoveny parametry jeho výšky, průměru či rozdílu jeho jasové teploty oproti teplotě rovnovážné hladiny, tudíž žádná formální definice zatím neexistuje. To také zapříčiňuje trochu rozdílné pojetí tohoto jevu u některých autorů a porovnání úspěšnosti detekce vrcholů na základě různých algoritmů pak nemusí být zcela objektivní. V Evropě bývají jako přestřelující vrcholy označovány takové, které vyčnívají minimálně 1 km nad okolní hranici oblačnosti. Letecké fotografie přestřelujících vrcholů jsou k vidění na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 Přestřelující vrcholy pozorované z letadel

(zdroj: <http://tornado.sfsu.edu>; <http://www.stormchase-wa.com/gallery/>)

Doba existence jednotlivých přestřelujících vrcholů je přibližně 5 – 15 minut (Setvák et al., 2008b). Po proniknutí tropopauzou se nadále přibližně nasyceně adiabaticky ochlazují o $7 - 9 \text{ K.km}^{-1}$ (Negri, 1982), míšení vzduchu s okolním prostředím je při tomto výstupu v porovnání s poklesovou fází malé. Čím rychleji prorůstají přestřelující vrcholy vzhůru, tím méně je jejich teplota ovlivňována okolním, povětšinou výrazně teplejším prostředím spodní stratosféry. Nejnižší teploty jsou dosaženy přibližně v nejvyšší nadmořské výšce. Poté přestřelující vrchol ztratí kinetickou energii, klesá dolů a po několika oscilacích se ustálí v rovnovážné hladině HHO bouře. Míra vtahování teplejšího vzduchu není zatím přesně známa, teplota kolabujících vrcholů však bývá, alespoň podle některých družicových snímků, výrazně vyšší než je teplota tropopausy.

Nejvyšší pozorované rozdíly teplot přestřelujících vrcholů oproti teplotě tropopausy dosahují okolo 15 – 20 K, na snímcích AVHRR/NOAA ale byla pozorována i nižší teplotní minima (Řezáčová et al., 2007). Tyto případy by odpovídaly maximálním výškám přestřelujících vrcholů přes 2 km nad okolní HHO bouře. Dle Nováka a Setváka (2008) mohou být přestřelující vrcholy až o 20 – 30 K chladnější než teplota tropopausy. Pomocí lidarů neseného letadlem Heymsfield et al. (1991) naměřili výšky ~ 2 km, Shenk in Bedka et al. (2010) odhadli na základě pořízených leteckých fotografií maximální výšky pozorovaných přestřelujících vrcholů na 1,6 km.

Problémy při interpretaci satelitních snímků teplotního pole HHO způsobuje čas a periodičita snímání družice vzhledem k vývojovému stadiu přestřelujících vrcholů. Pro výzkum jejich životního cyklu a frekvenci vývoje po sobě následujících přestřelujících vrcholů by bylo vhodné využít snímky z tzv. *rapid-scan* režimu amerických družic GOES, který je schopen snímat až do frekvence 30 sekund. Žádná taková studie ale zatím vypracována nebyla (Setvák et al., 2008b). Další problém při interpretaci teplot a souvisejících výšek HHO představují vyvýšené dómy v centrálních oblastech bouře obklopující přestřelující vrcholy, které mohou být vnořené do teplejší spodní stratosféry. K těmto případům dochází především u supercel, kdy po dlouhou dobu a opakovaně působí silné updrafty. Někdy rovněž nastane situace, že se teplotní minima vyskytují na hladině kovadlin a nejsou ztotožněna s přestřelujícími vrcholy. Vysvětlení příčin tohoto jevu je doposud neznámé.

Aktivitou přestřelujících vrcholů může docházet ke vzniku vleček a přenosu vodní páry do spodní stratosféry, jak bylo doloženo pomocí numerického modelování

(Wang, 2003) i výsledků družicového pozorování (Setvák et al., 2007). Na závětrné straně přestřelujících vrcholů jsou někdy na tepelných snímcích pozorovatelné teplé oblasti CWA a DWA (*close-in warm area* a *distant warm area*), což souvisí s celou řadou procesů, které se zde vyskytují (závětrné efekty, vlečky, gravitační vlny, cirry). Tento typ bouří vykazuje již dříve zmíněné studené U/V.

Bedka et al. (2010) rozlišují dokonce tři kategorie bouří s přestřelujícími vrcholy, a to na základě vztahu pole jasové teploty a HHO bouře. V prvním případě se jedná o „klasické“ přestřelující vrcholy, které se na snímcích pořízených v tepelném pásmu projevují teplotními minimy. Další dvě kategorie de facto odpovídají bouřím se studenými U/V a studenými prstenci. U bouří se studeným U/V je přestřelující vrchol lokalizován v jeho vrcholu a vykazuje také nejnižší teplotu. U třetí kategorie dle autorů teplotní minimum s přestřelujícími vrcholy nesouvisí, což může nastat, ale nemusí. Nutno dodat, že bouře s výraznými studenými prstenci nebo studenými U/V se vyskytují oproti ostatním poměrně vzácně. Možnostmi detekce přestřelujících vrcholů na družicových snímcích se blíže zabývá kapitola 4.3.

4. DRUŽICOVÁ POZOROVÁNÍ KONVEKTIVNÍCH BOUŘÍ

4.1 Družice používané pro meteorologické účely

Současné meteorologické družicové systémy můžeme dle charakteru jejich oběžných drah kolem Země, což zcela zásadně ovlivňuje využití jimi pořízených dat, rozdělit na dvě základní kategorie. První tvoří družice na geostacionární dráze (GEO, *Geostationary Earth Orbit*) s výškou dráhy nad zemským povrchem přibližně 35 790 km, rovinou totožnou s rovinou rovníku a dobou rotace odpovídající zemské rotaci. Tím je zajištěno, že satelit zdánlivě „visí“ nad jedním místem na zemském povrchu a nepřetržitě snímá stejné území. Pro evropské meteorologické služby mají největší význam družice Meteosat, v současné době Meteosat druhé generace MSG (*Meteosat Second Generation*) provozované organizací EUMETSAT (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*). Česká republika je od roku 2005 spolupracujícím státem této organizace, 22. června 2009 byla podepsána dohoda o plném členství v EUMETSATu, které by mělo vstoupit v platnost k 1. lednu 2010. Klíčovým přístrojem družic MSG je radiometr SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*).

Druhou skupinou jsou družice na nízkých drahách (LEO, *Low Earth Orbit*) někdy označované jako polární družice, či družice na polárních drahách. Sklon jejich dráhy k rovině rovníku se jen mírně odchyluje od úhlu 90°, výška dráhy je v rozmezí 600 až 2000 km (záleží na zdroji, dle www.wikipedia.org), doba oběhu činí okolo 100 minut. Pro potřeby práce byla použita data z amerických družic NOAA/POES (*National Oceanic and Atmospheric Administration, Polar Operational Environmental Satellite*) a evropské družice MetOp (*Meteorological Operational Polar Satellites of EUMETSAT*), obojí nesoucí přístroj AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), v současnosti jeho 3. generaci.. Dále byly zpracovány snímky z družic NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) EOS Aqua a Terra pořízené přístrojem MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Do této kategorie patří velké množství dalších družic, jejichž zaměření je především výzkumné.

4.1.1 Družice MSG a radiometr SEVIRI

V současnosti jsou v operativním provozu dvě družice systému Meteosat druhé generace MSG. První družice, MSG-1 (Meteosat-8), byl vypuštěn 28. 8. 2002, operativním se stal v lednu 2004. Od roku 2007 plní funkci záložní družice pro primární MSG-2 (Meteosat-9), který byl vypuštěn 21. 12. 2005, operativní provoz nastal v polovině roku 2006 (http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites). Družice jsou stabilizovány vlastní rotací a to 100 otáček za minutu, která je rovněž využita pro mechanismus snímání přístrojem SEVIRI.

Oproti družicím Meteosatu první generace, které snímaly s frekvencí 30 minut, je časová rozlišovací schopnost MSG poloviční, tj. nový snímek je k dispozici každých 15 minut. Meteosat-9 je nyní umístěn nad průsečíkem rovníku a nultého poledníku, snímá tedy oblast Afriky, většinu Evropy a Atlantského oceánu, kus jižní Ameriky a západní část Indického oceánu. Limitem viditelnosti nejen MSG-2, ale všech geostacionárních družic, je 81° zeměpisné šířky (Řezáčová et al., 2007), pro vyšší zeměpisné šířky však nejsou data použitelná kvůli příliš šikmému úhlu snímání. Záložní Meteosat-8 byl na jaře 2008 přesunut na $9,5^\circ$ východní zeměpisné délky, kdy započalo snímání severní třetiny zemského disku, a to v 5-minutovém rapid-scanu. Tato data byla kvůli časovému rozlišení použita pro potřeby práce.

Hlavním přístrojem družic MSG je radiometr SEVIRI. Na rozdíl od přístroje VISSR (*Visible and Infrared Spin Scan Radiometer*) má vyšší geometrickou i spektrální rozlišovací schopnost. Disponuje 12 kanály, viz. tabulka 4.1. Ty jsou označovány buď pořadovým číslem nebo názvem. Jedenáct z nich je úzkopásmových a má rozlišení 3×3 km v nadiru, pro oblast střední Evropy zhruba 4×6 km (záleží zda jde o MSG-1, nebo MSG-2), kanál HRV (*High Resolution Visible*) je širokopásmový s rozlišením 1×1 km, ve střední Evropě přibližně 2×3 km.

Kvůli rychlejšímu snímání jsou pro každý spektrální kanál umístěny v ohniskové rovině hned tři čidla (pro kanál HRV je jich devět), tudíž jsou v rámci jedné otočky snímány tři obrazové řádky naráz. Skenování probíhá od jižního pólu k severnímu, od východu na západ. Naměřená surová data jsou nejprve přenesena do řídicího centra organizace EUMETSAT v německém Darmstadtu, kde je prověřena jejich kvalita a jsou zkorigována, poté probíhá jejich distribuce koncovým uživatelům. Existují dva typy digitálního přenosu uživatelským stanicím – rychlejší a bezeztrátový HRIT (*High Rate Information Transmission*) a pomalejší LRIT (*Low Rate Information Transmission*).

Data mohou být distribuována prostřednictvím vlastní družice, což byl původně plánovaný primární způsob přenosu, nebo přes komerční telekomunikační družice, tento systém je označován jako EUMETCast (*EUMETSAT Multicast Distribution System*).

Tab. 4.1 Seznam spektrálních kanálů přístroje SEVIRI

Kanál	Označení kanálu	Rozsah vlnových délek	Poznámka
01	VIS 0.6	0,56 - 0,71 μm	viditelné záření
02	VIS 0.8	0,74 - 0,88 μm	blízké infračervené záření
03	NIR 1.6	1,50 - 1,78 μm	blízké infračervené záření
04	IR 3.9	3,48 - 4,36 μm	infračervené záření, atmosférické okno
05	WV 6.2	5,35 - 7,15 μm	pásmo absorpce vodní parou
06	WV 7.3	6,85 - 7,85 μm	pásmo absorpce vodní parou
07	IR 8.7	8,30 - 9,10 μm	tepelné záření, atmosférické okno
08	IR 9.7	9,38 - 9,94 μm	tepelné záření, pásmo absorpce O ₃
09	IR 10.8	9,80 - 11,80 μm	tepelné záření, atmosférické okno
10	IR 12.0	11,00 - 13,00 μm	tepelné záření, atmosférické okno
11	IR 13.4	12,40 - 14,40 μm	tepelné záření, pásmo absorpce CO ₂
12	HRV	0,50 - 0,90 μm	viditelné záření, vysoké rozlišení

(zdroj: Řezáčová et al., 2007)

4.1.2 Systém družic na polární dráze NOAA

Označení družic NOAA vychází z názvu vládní agentury Spojených států amerických *National Oceanic and Atmospheric Administration*, která je jejich provozovatelem. Éra nové generace družic NOAA začala v roce 1998 vypuštěním satelitu NOAA-15 (NOAA-K²). Po ní následovaly další družice NOAA-16 (NOAA-L) a NOAA-17 (NOAA-M). Tyto družice označované jako série KLM jsou konstrukčně odlišné od předchozích. K nim přibýly NOAA-18 (NOAA-N) a zatím nejnovější družicí je satelit NOAA-19 (NOAA-N').

Tab. 4.2 Parametry drah jednotlivých operativních družic NOAA

Označení	Start	Inklinace [°]	Doba oběhu [min]	Perigeum [km]	Apogeum [km]
NOAA 15	13.5.1998	98,57	101,07	802	817
NOAA 16	21.9.2000	99,14	101,95	843	858
NOAA 17	24.6.2002	98,56	101,13	804	820
NOAA 18	20.5.2005	98,85	102,05	845	867
NOAA 19	6.2.2009	98,73	102,07	845	868

(zdroj: <http://www.lib.cas.cz/space.40>)

² Před startem je družice označována písmenem, po dosažení plánované dráhy pak pojmenována číslicí. NOAA KLM tak odpovídá družicím NOAA 15, 16, 17.

Polární dráha uvedených družic má sklon vůči rovině rovníku zhruba 99° . Satelity se pohybují ve výšce přibližně 810 až 850 km nad povrchem Země, čemuž odpovídá oběžná doba okolo 102 minut. Satelity neobíhají Zemi přímočaše (tj. od západu k východu), ale retrográdně (tj. od východu k západu). Díky tomu družice překračují rovinu rovníku vždy o $25,5^\circ$ západněji než při předchozím obletu (Goodrum et al., 2009). Dráha družic je heliosynchronní, tj. družice přelétá určitou zeměpisnou šířku vždy ve stejném místním slunečním čase (postavení družice-Země-Slunce je při všech obletech stejné). Družice jsou stabilizovány na oběžné dráze a orientovány pomocí gyroskopů (systém čtyř setrvačníků), což umožňuje na satelit umístit větší množství přístrojů. Přehled údajů o drahách jednotlivých operativních družic NOAA je podán v předchozí tabulce 4.2.

Hlavním přístrojem družice NOAA je radiometr AVHRR, současné operativní družice nesou verzi označovanou jako AVHRR/3. Radiometr snímá zemský povrch v šesti různých spektrálních kanálech, viz. tabulka 4.3. V prvních třech spektrálních kanálech se uplatňuje odražené záření Slunce, v kanálech 4 a 5 záření tepelné, kanál 3B je v denních hodinách kanálem smíšeným, v nočních tepelným. Radiometr snímá pás široký přibližně 3000 km vymezený zorným polem $\pm 55,4^\circ$, geometrická rozlišovací schopnost přístroje je $1,1 \times 1,1$ km v nadiru, na okraji snímaného pásu asi $2,5 \times 4,5$ km. Data zobrazující určité území bývají z jedné družice k dispozici zpravidla dvakrát za 24 hodin, výjimkou jsou polární oblasti. Tím pádem není možné sledovat vývoj oblačnosti, snímky představují pouze nahodilé momentky.

Tab. 4.3 *Spektrální kanály přístroje AVHRR/3*

Kanál	Rozsah vlnových délek	Poznámka
1	0,58 - 0,68 μm	viditelné (červené) záření
2	0,725 - 1,00 μm	blízké infračervené záření
3A	1,58 - 1,64 μm	blízké infračervené záření
3B	3,55 - 3,93 μm	(střední) infračervené záření, atmosférické okno
4	10,30 - 11,30 μm	tepelné záření, atmosférické okno
5	11,50 - 12,50 μm	tepelné záření, atmosférické okno

(zdroj: Řezáčová et al., 2007)

Pořízená data jsou odesílána uživatelům v reálném čase bez jakýchkoli úprav, tento typ přenosu je označován jako HRPT (*High Resolution Picture Transmission*). Data o zobrazované geografické oblasti jsou přijímána v reálném čase, alespoň těmi stanicemi, které jsou v okamžiku snímání v zorném poli družice. Další možnosti jejich

získání je distribuce pomocí internetu či přenosem přes jiné družice. V současné době neplatí pro příjem a zpracování dat AVHRR žádná administrativní omezení. Snímky ve formátu *Level 1B* (data doplněná o navigační a kalibrační údaje) lze bezplatně získat např. z elektronického archivu úřadu NOAA označovaného jako CLASS (*Comprehensive Large Array-data Stewardship System*).

4.1.3 Družice MetOp

Družice MetOp-1, vypuštěná 19. 10. 2006 (<http://www.lib.cas.cz/space.40>), je první evropskou meteorologickou družicí na polární dráze. Je výsledkem spolupráce EUMETSATu a organizace NOAA. Spolu se dvěma následujícími satelity téhož jména by měla tvořit evropský systém EPS (*EUMETSAT Polar System*) a je součástí mezinárodního systému polárních meteorologických družic IJPS (*Initial Joint Polar-Orbiting Operational Satellite System*). Dráha družice je heliosynchronní, nachází se ve výšce 820 km, oběžná doba činí 101 minut. Stejně jako u družic NOAA je hlavním meteorologickým přístrojem radiometr AVHRR, blíže popsáný v předešlé kapitole. Mezi organizacemi EUMETSAT a NOAA existuje od roku 2005 dohoda o „sdílení“ polárních družic. S evropskými družicemi MetOp se počítá pro kooperativní provoz na ranní dráze, zatímco americké satelity NOAA budou nadále zajišťovat provoz na odpolední dráze.

4.1.4 Radiometr MODIS družic Terra a Aqua

Zobrazující spektorradiometr MODIS je základním přístrojem družic NASA EOS Terra a Aqua. Satelity Terra (vypuštěn 18. 12. 1999) a Aqua (4. 5. 2002) se pohybují na kvazipolárních dráhách ve výšce zhruba 700 km, proto i doba oběhu je o něco kratší než v případě dříve zmíněných polárních družic – necelých 99 minut. Sklon dráhy činí 99,2° (<http://www.lib.cas.cz/space.40>). Terra prolétá nad střední Evropou přibližně v 11 hodin místního (slunečního) času, Aqua okolo 13 hodin.

Přístroj MODIS se šířkou záběru 2230 km měří každé místo na Zemi opakovaně po 1-2 dnech ve 36-ti spektrálních kanálech. Je zdokonaleným nástupcem radiometru AVHRR, kromě většího počtu kanálů disponuje také lepší rozlišovací schopností. Ne všechny kanály jsou ale vhodné pro výzkum oblačnosti. MODIS je kromě pozorování atmosféry určen také pro studium fyzikálních a biologických procesů probíhajících na

zemském povrchu a hladinách oceánů a pro zkoumání klimatického systému Země. Přehled kanálů je zobrazen v tabulce 4.4. Geometrické rozlišení přístroje závisí na jednotlivých kanálech – dva snímají v 250metrovém rozlišení, pět v 500metrovém, zbývající kanály poskytují data s rozlišením 1 km. Systém přenosu dat je podobný jako v případě družic NOAA či MetOp. Před vypuštěním družic MSG byl tento přístroj používán pro simulaci a studium oblačnosti v kanálech přístroje SEVIRI (Řezáčová et al., 2007).

Tab. 4.4 Přehled spektrálních kanálů přístroje MODIS

Reflected Solar Bands			Emissive Bands	
Aggregated 250 m	Aggregated 500 m	1 km	1 km	
■ Band 1 (620-670 nm) HRV	■ Band 3 (459-479 nm)	■ Band 8 (405-420 nm)	■ Band 20 (3.660-3.840 μm)	IR 3.9
■ Band 2 (841-876 nm) VIS 0.8	■ Band 4 (545-565 nm) VIS 0.6	■ Band 9 (438-448 nm)	■ Band 21 (3.929-3.989 μm)	IR 3.9
	■ Band 5 (1230-1250 nm)	■ Band 10 (483-493 nm)	■ Band 22 (3.939-3.989 μm)	IR 3.9
	■ Band 6 (1628-1652 nm) IR 1.6	■ Band 11 (526-536 nm)	■ Band 23 (4.020-4.080 μm)	IR 3.9
	■ Band 7 (2105-2155 nm)	■ Band 12 (546-556 nm)	■ Band 24 (4.433-4.498 μm)	
		■ Band 13L (662-672 nm)	■ Band 25 (4.482-4.549 μm)	
		■ Band 13H (662-672 nm)	■ Band 27 (6.535-6.895 μm) WV 6.2	
		■ Band 14L (673-683 nm)	■ Band 28 (7.175-7.475 μm) WV 7.3	
		■ Band 14H (673-683 nm)	■ Band 29 (8.400-8.700 μm) IR 8.7	
ZELENE = použitelné pro studium oblačnosti		■ Band 15 (743-753 nm) VIS 0.8	■ Band 30 (9.580-9.880 μm) O3 9.7	
ČERVENĚ = jiné aplikace		■ Band 16 (862-877 nm) VIS 0.8	■ Band 31 (10.780-11.280 μm) IR 10.8	
MODŘE = odpovídající kanály MSG SEVIRI		■ Band 17 (890-920 nm)	■ Band 32 (11.770-12.270 μm) IR 12.0	
		■ Band 18 (931-941 nm)	■ Band 33 (13.185-13.485 μm) CO2 13.4	
		■ Band 19 (915-965 nm)	■ Band 34 (13.485-13.785 μm) CO2 13.4	
		■ Band 26 (1.360-1.390 μm)	■ Band 35 (13.785-14.085 μm) CO2 13.4	
			■ Band 36 (14.085-14.385 μm) CO2 13.4	

(zdroj: Novák, Setvák, 2008)

4.2 Multispektrální charakteristiky oblačnosti konvektivních bouří

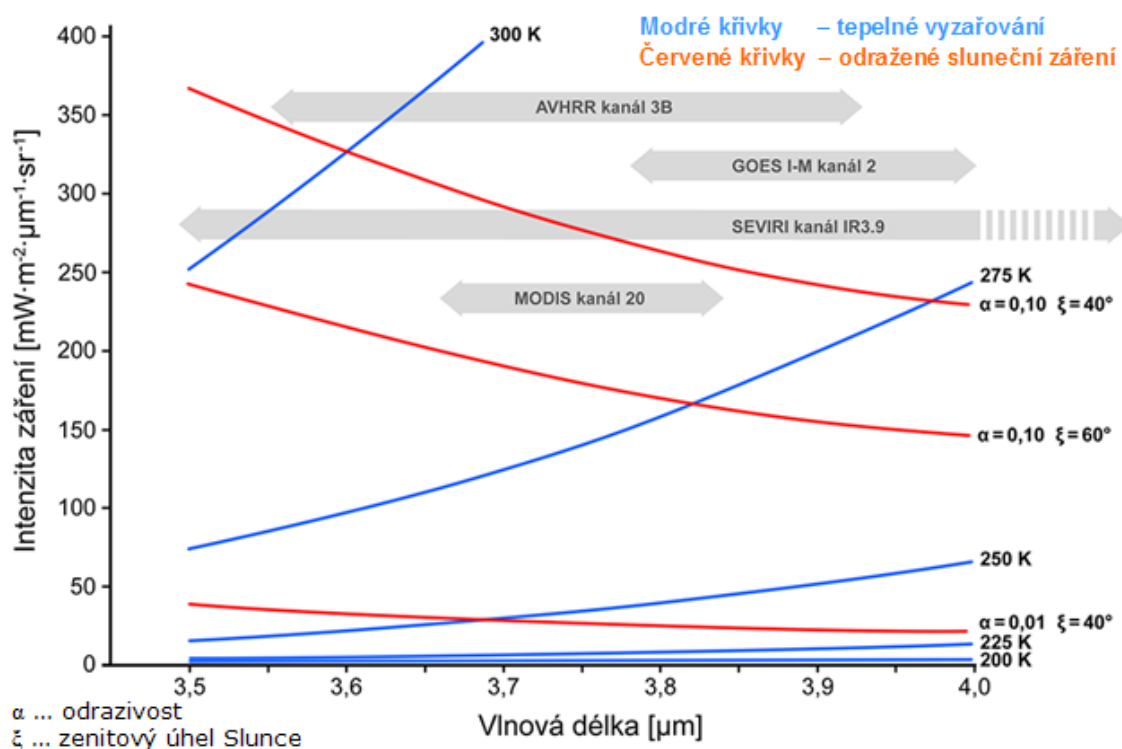
4.2.1 Základy multispektrální interpretace

Na základě snímků operativních meteorologických družic jsme schopni monitorovat pouze horní hranici oblačnosti. Její charakteristiky jsou ale výsledkem vnitřních procesů a interakcí, které probíhají v prostředí dané bouře. Pomocí jednotlivých spektrálních pásem a jejich kombinací jsme schopni zjistit povahu dané bouře a pozorovat určité jevy vyskytující se na HHO bouří. Multispektrální charakteristiky oblačnosti konvektivních bouří jsou dány především výškou, které oblačnost dosahuje a která souvisí s její teplotou, a mikrofyzikálním složením oblačnosti, tedy fází, velikostí a koncentrací oblačných částic, případně tvarem a orientací krystalků. Pro okrajové transparentní oblasti bouří má vliv i charakter zemského povrchu a nižších atmosférických hladin. Kromě těchto parametrů záleží

v případě solárních kanálů na podmínkách pozorování, tedy zenitovém úhlu Slunce a úhlu snímání družice.

Cumulonimby (neboli bouřkové oblaky, Cb) mají značný vertikální rozsah, mohou prorůst až do spodní stratosféry, jedná se tedy o velice chladnou oblačnost. Oblak obsahuje částice kapalně vody i ledu. Při teplotách pod -43°C , tedy v jeho horních partiích, se vyskytují již jen částice ledové, a to v řádové velikosti desítek mikrometrů. Mimo okrajové partie kovadlin, které jsou propustné, se jedná o oblačnost opticky značně hustou.

Celkové záření měřené družicí má více složek, a to odražené (rozptýlené) sluneční záření (viditelné - VIS a částečně blízké infračervené pásmo - NIR) a emitované záření určitých povrchů (infračervené - IR, mikrovlnné - MW a částečně blízké infračervené pásmo - NIR). V závislosti na propustnosti může jít o kombinaci několika zdrojů majících původ v různých výškách atmosféry. Poměr těchto druhů záření závisí nejen na charakteristikách povrchů a podmínkách snímání, ale především na vlnové délce, tedy spektrálním pásmu.



Obr. 4.1 Intenzita odraženého slunečního záření a tepelného záření v pásmu 3,5 až 4 μm

(Poměry jsou zobrazeny pro různé parametry odrazivosti α , zenitového úhlu Slunce ξ a teploty povrchu T ;

zdroj: Novák, Setvák, 2008)

Základní vztahy fyziky záření lze najít v mnoha publikacích (např. Halounová, Pavelka, 2005; Lillesand, Kiefer, 1994; Menzel, 2001), nebudeme se jimi tedy podrobně zabývat. Intenzita odraženého (rozptýleného) slunečního záření v určité vlnové délce se zvyšuje s rostoucí spektrální odrazivostí daného povrchu α_λ (tj. odrazivostí pro danou vlnovou délku λ) a klesajícím zenitovým úhlem Slunce ζ (úhlová vzdálenost Slunce od zenitu). Vliv má dále hlavně při nízkých výškách Slunce nad obzorem (vysokém zenitovém úhlu Slunce) a nízkém úhlu snímání družice charakter rozptylu, který pro oblačné částice není Lambertovský (difúzní), ale převládá rozptyl dopředný. Velikost emitovaného záření závisí pro danou vlnovou délku na teplotě daného povrchu T . V úseku mezi 3,5 až 4 μm je obojí záření přibližně rovnocenné, to, které převládne, záleží na různých parametrech, viz. obrázek 4.1. V denních hodinách se tak uplatňuje odražené sluneční záření i tepelná složka, v nočních jen tepelné vyzařování.

Vzhled oblačnosti v různých spektrálních kanálech závisí tedy na jejich fyzikálních parametrech - spektrální odrazivosti α_λ , spektrální propustnosti τ_λ a spektrální emisivitě ε_λ . Spektrální emisivita, neboli vyzařovací schopnost v dané vlnové délce, určuje z hlediska záření odchylku reálného povrchu od fyzikálně ideálního černého tělesa. Je vyjadřována v rozsahu od nuly do jedné, nebo v procentech a dána vztahem (Řezáčová et al., 2007):

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\text{reálná hodnota vyzařování}(\lambda)}{B_\lambda(T)}, \quad (4.1)$$

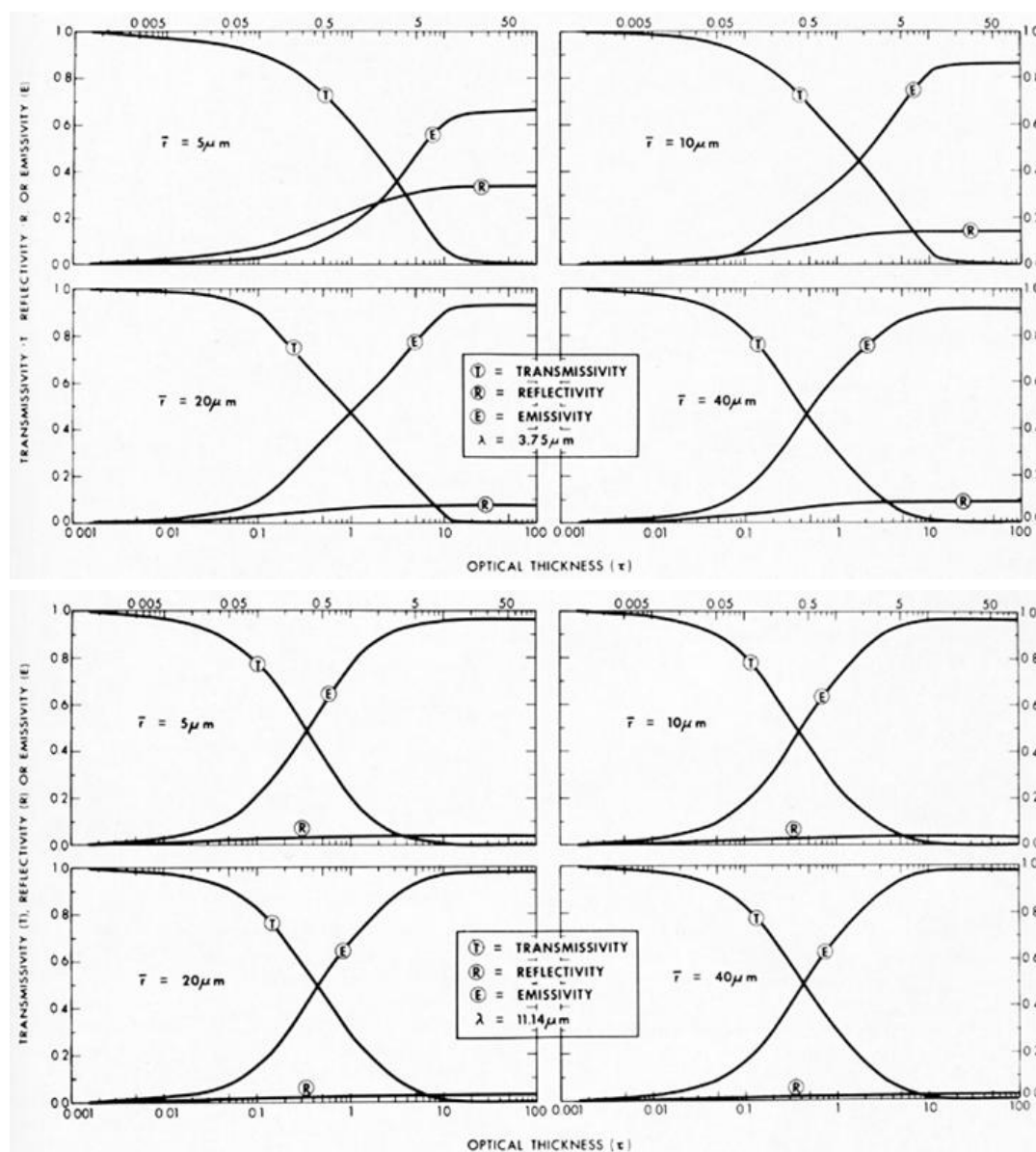
kde „reálná hodnota vyzařování (λ)“ je skutečně vyzařená hodnota elektromagnetického záření ve vlnové délce λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$] a $B_\lambda(T)$ je spektrální hustota záření ve vlnové délce λ vyzařovaná černým tělesem o teplotě T [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$].

Pro potřeby družicové interpretace, jelikož neznáme v prvním přiblížení přesnou hodnotu emisivity určitého typu oblačnosti nebo zemského povrchu v daném kanálu, se zavádí veličina jasová teplota (někdy radiační teplota, *brightness temperature*, BT). Je to fiktivní teplota přiřazená danému povrchu za předpokladu, že by vyzařoval jako černé těleso (tedy jeho emisivita by byla rovna jedné). Jasová teplota je vždy nižší než reálná, termodynamická teplota T daného povrchu. Na základě naměřené intenzity záření lze jasovou teplotu v dané vlnové délce λ určit pomocí inverzní Planckovy funkce. Blíže se problematikou kalibrace družicových snímků na jasovou teplotu zabývá kapitola 5.2.

Za předpokladu tepelné rovnováhy platí pro propustnost τ_λ , odrazivost α_λ , a emisivitu ε_λ Kirhoffův vztah (Řezáčová et al., 2007):

$$\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1. \quad (4.2)$$

Pro dostatečně hustou oblačnost konvektivních bouří jsou pak odrazivost a emisivita doplňkové veličiny. Kromě vlnové délky závisí tyto fyzikální parametry oblačnosti na jejím mikrofyzikálním složení. Na obr. 4.2 je demonstrován vliv velikosti částic a optické hustoty oblačnosti na průběh těchto veličin pro pásma 3,75 μm a 11 μm .



Obr. 4.2 Vliv optické tloušťky HHO na průběh odrazivosti (R), propustnosti (T) a emisivity (E) pro sférické částice různých poloměrů pro vlnové délky 3,75 a 11 μm

(zdroj: Rao et al., 1990)

V pásmu přibližně 3,5 až 4,0 μm , kde se uplatňují v denních hodinách obě složky záření, závisí emisivita a odrazivost výrazně na velikosti částic. Vzhledem k nízkým teplotám HHO převládá ve dne odražené sluneční záření. Čím menší je rozměr částic, tím je odrazivost vyšší a emisivita nižší. V tepelném pásmu kolem 11 μm výrazná závislost emisivity na velikosti částic neexistuje.

Pro vysokou oblačnost konvektivních bouří, kterou tvoří větší krystalky ledu (řádově desítky mikronů), tedy platí, že se svými vlastnostmi blíží černému tělesu. Na denních snímcích mají zpravidla cumulonimby nízkou odrazivost v NIR a pro centrální partie bouří, které jsou opticky husté, existují mezi pásmy NIR a IR pouze malé rozdíly v jasové teplotě. Ovšem i zde existují výjimky a některé konvektivní bouře se na družicových snímcích projevují v určitých oblastech zvýšenou odrazivostí v NIR. To je následkem přítomnosti velice malých ledových krystalků, což může značit intenzivnější updrafty v oblaku, které souvisejí s přestřelujícími vrcholy, a přítomnost vleček Levizzani, Setvák, (1996), Melani et al. (2003).

4.2.2 Vzhled konvekční oblačnosti na družicových snímcích

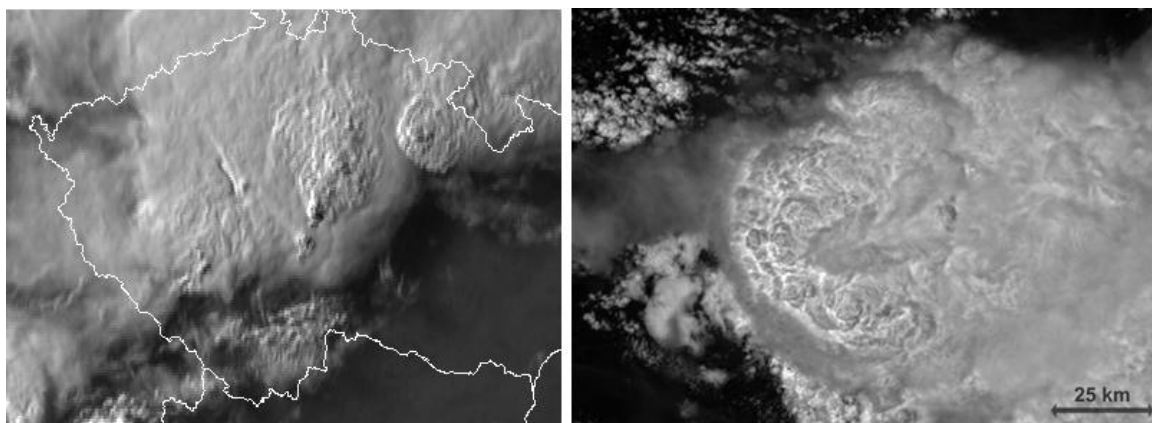
Na družicových snímcích se oblačnost konvektivních bouří může projevoval různými způsoby, záleží na použitých kanálech a jejich barevných kombinacích. Následující tabulka podává přehled spektrálních kanálů přístrojů AVHRR, MODIS a SEVIRI, které jsou vhodné a také používány pro pozorování konvektivních bouří.

Tab. 4.5 Spektrální kanály radiometrů některých družic používané pro monitoring bouří

Spektrální pásmo/kanál	AVHRR/3 (NOAA, METOP)	MODIS * (Aqua, Terra)	SEVIRI (MSG)
Viditelné (VIS) a krátkovlnná část NIR (přibližně 0.4 - 1.2 μm)	kanál 1 (0.58-0.68 μm) kanál 2 (0.7-1.1 μm)	kanál 3 (0.459-0.479 μm) kanál 4 (0.545-0.565 μm) kanál 1 (0.62-0.67 μm) kanál 5 (1.23-1.25 μm)	kanál 01 VIS 0.6 (0.56-0.71 μm) kanál 02 VIS 0.8 (0.74-0.88 μm) kanál 12 HRV (0.5-0.9 μm)
„Mikrofyzikální kanály“ (NIR) (přibližně 1.6 μm a 3.5 - 4 μm)	kanál 3A (1.58-1.64 μm) kanál 3B (3.5-4.0 μm)	kanál 6 (1.628-1.652 μm) kanál 7 (2.105-2.155 μm) kanál 20 (3.66-3.84 μm)	kanál 03 IR 1.6 (1.5-1.78 μm) kanál 04 IR 3.9 (3.48-4.36 μm)
Pásmo absorpce vodní páry (WV)	---	kanál 27 (6.535-6.895 μm) kanál 28 (7.175-7.475 μm)	kanál 05 WV 6.2 (5.35-7.15 μm) kanál 06 WV 7.3 (6.85-7.85 μm)
Pásmo IR atmosférického okna "split-window"	kanál 4 (10.2-11.5 μm) kanál 5 (11.5-12.5 μm)	kanál 29 (8.40-8.70 μm) kanál 31 (10.78-11.28 μm) kanál 32 (11.77-12.27 μm)	kanál 07 IR 8.7 (8.30-9.10 μm) kanál 09 IR 10.8 (9.80-11.80 μm) kanál 10 IR 12.0 (11.00-13.00 μm)

(zdroj: Novák, Setvák, 2008)

Viditelné pásmo poskytuje informaci o optické tloušťce oblačnosti. Centrální partie konvektivních bouří se v něm jeví jasně bílé, transparentní části kovadlin tmavší. Dále je možné zachytit texturu horní hranice oblačnosti bouří a rozpoznat různé jevy, které se zde vyskytují. Záleží ovšem na geometrické rozlišovací schopnosti přístroje. Při různých úhlech postavení Slunce a družice jsou na HHO pozorovány stíny, které mohou rovněž přispět k detekci např. přestřelujících vrcholů, v některých případech (velký zenitový úhel) naopak jejich identifikaci ztěžují a mohou být zaznamenány falešné alarmy (Bedka et al., 2010). Příklady bouří na snímcích pořízených v kanálech viditelného spektra jsou na obrázku 4.3. Některé projevy přízemních jevů zasahující mimo oblačnost bouře zachycené ve viditelném pásmu jsou ke shlédnutí na obr. 3.4.



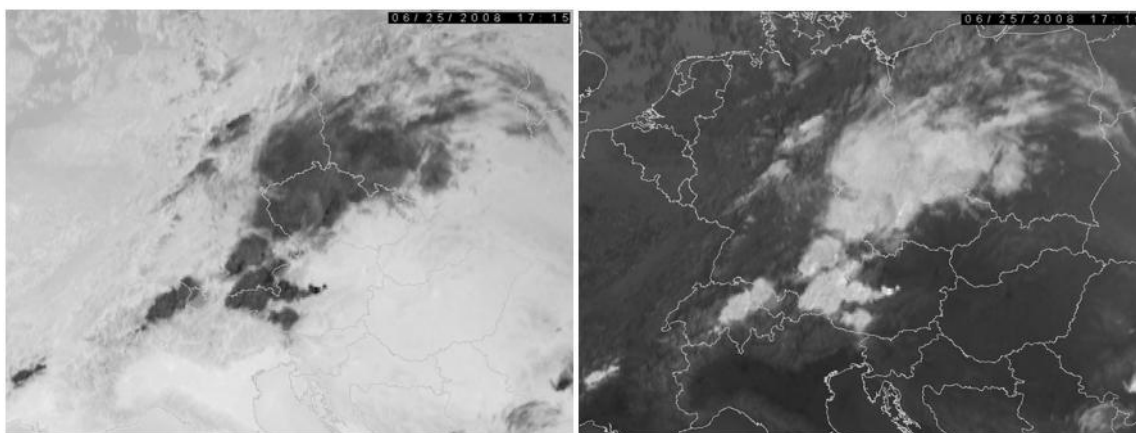
Obr. 4.3 Struktura HHO (přestřelující vrcholy, vlečka) konvektivních bouří

(Vlevo: MSG-1, 25. 6. 2008, 17:15 UTC (HRV), ČR. Vpravo: MODIS Aqua, 3. 6. 2003, 19:25 UTC (kanál 1), Louisiana, USA; zdroj: archiv ČHMÚ; Řezáčková et al., 2007)

Mikrofyzikální vlastnosti HHO konvektivních bouří, tedy velikost, tvar a koncentrace ledových krystalů, jsou zkoumány především v NIR pásmu ($\sim 1,5$ až $4,0 \mu\text{m}$). Celkové záření je kvůli nízkým teplotám a zpravidla nízké odrazivosti HHO bouří tvořených ledovými krystalky nízké, zvýšené hodnoty jsou způsobeny přítomností malých ledových krystalků v určitých partiích bouře, které mají vysokou odrazivost.

Pro družicové snímky snímané v kanálech $\sim 3,5$ až $4,0 \mu\text{m}$ je vzhledem k podstatě záření zvyklostí používat dva typy zobrazení, jak je patrné z obrázku 4.4. V prvním případě snímky vypadají jako snímky ve viditelném pásmu zobrazující odrazivost (označováno REF – *reflectance*), což znamená, že čím je odrazivost povrchu vyšší, tím se na snímcích jeví světlejší. Druhou možností je zobrazení podobné snímkům s tepelným vyzařováním v infračerveném pásmu (označováno IR nebo RAD –

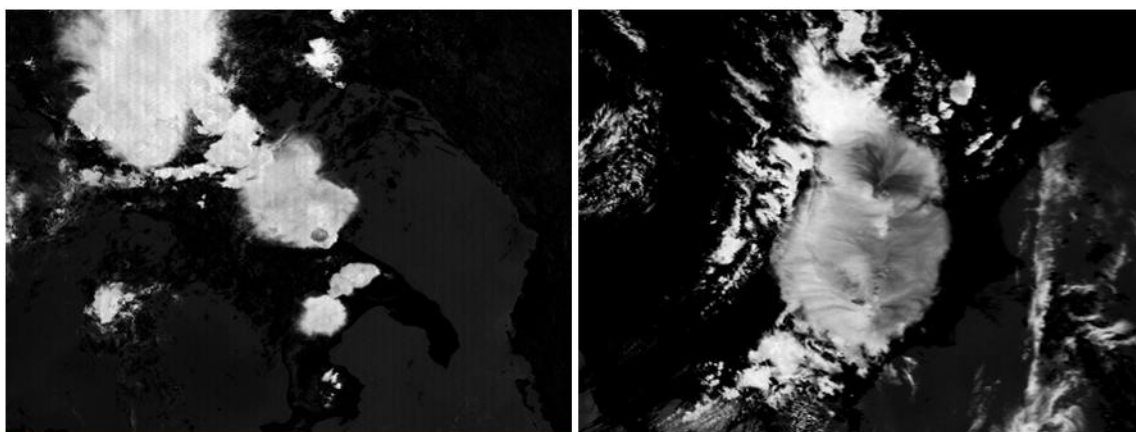
radiance). U těch je v družicové meteorologii zvykem, že chladnější objekty jsou zobrazovány světleji a teplejší se jeví tmavší.



Obr. 4.4 Dvojí možnost zobrazení družicových snímků v pásmu $\sim 3,5$ až $4,0 \mu\text{m}$

(MSG-1, bouře ze dne 25. 6. 2008, 17:15 UTC (IR3.9), ČR. Vlevo: zobrazení REF. Vpravo: zobrazení RAD; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Zvýšená odrazivost v pásmu $\sim 3,5$ až $4,0 \mu\text{m}$ může být dvojího typu. Buď je vázána na oblast jádra bouře nebo může zahrnovat významnou část či celou HHO bouře, což je způsobeno silnými vzestupnými proudy, nebo jde o typ připomínající vlečky (Řezáčová et al., 2007), kterými se blíže zabývá např. Levizzani, Setvák (1996). Tyto typy jsou patrné z obrázku 4.5.

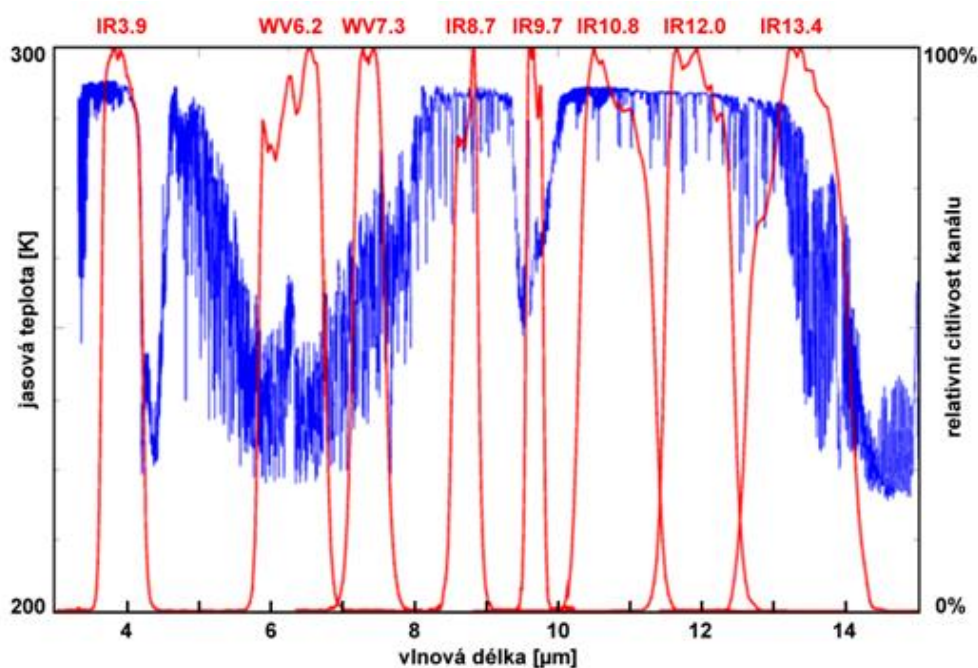


Obr. 4.5 Příklady zvýšené odrazivosti (jádro bouře, vlečka) v pásmu $\sim 3,5$ až $4,0 \mu\text{m}$

(Vlevo: AVHRR NOAA 9, 9. 7. 1987, 13:54 UTC (kanál 3 ENH – RAD). Vpravo: AVHRR NOAA 11, 28. 8. 1991, 14:58 UTC (kanál 3 ENH - RAD); zdroj: Novák, Setvák, 2008)

Kromě mikrofyzikálních charakteristik HHO bouří je nutné si uvědomit, že odrazivost je funkcí také geometrických parametrů nasvícení a snímání, vzhledem k tomu, že na oblačných částicích převládá rozptyl dopředný. Proto se aplikují tzv. dvousměrové rozdělovací funkce odrazivosti (BRDTs, *bidirectional reflectance distribution functions*), tedy funkce, pomocí nichž lze definovat reflexní a spektrální charakteristiky povrchu. Další možností je použití modelů radiačního přenosu (RTM, *radiative transfer model*), viz. například (Melani et al., 2003).

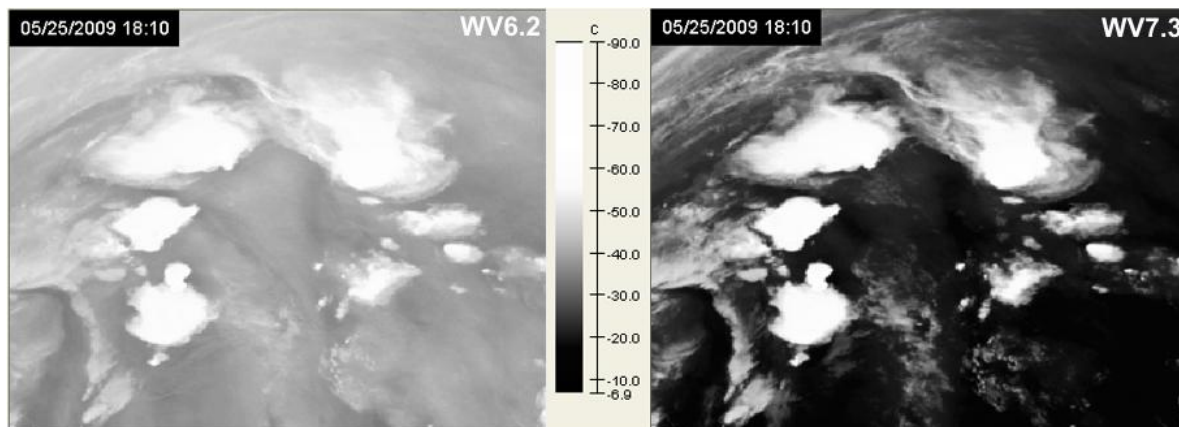
V kanálech vodní páry (SEVIRI – WV6.2 a WV7.3, MODIS – kanály 27, 28) je detekována vlhkost v atmosféře. Na obrázku 4.6 je zobrazena propustnost atmosféry a umístění jednotlivých IR a WV kanálů SEVIRI. Z něho vyplývá, že v pásmu $\sim 6,2 \mu\text{m}$ je detekována vlhkost ve vyšších hladinách, v pásmu $\sim 7,3 \mu\text{m}$ v hladinách nižších, může být tedy použito pro pozorování začínající konvekce (EUMETSAT, 2006). Rozdíl jasových teplot na snímcích pořízených v těchto kanálech je patrný z obr. 4.7.



Obr. 4.6 Propustnost atmosféry a umístění IR a WV kanálů SEVIRI

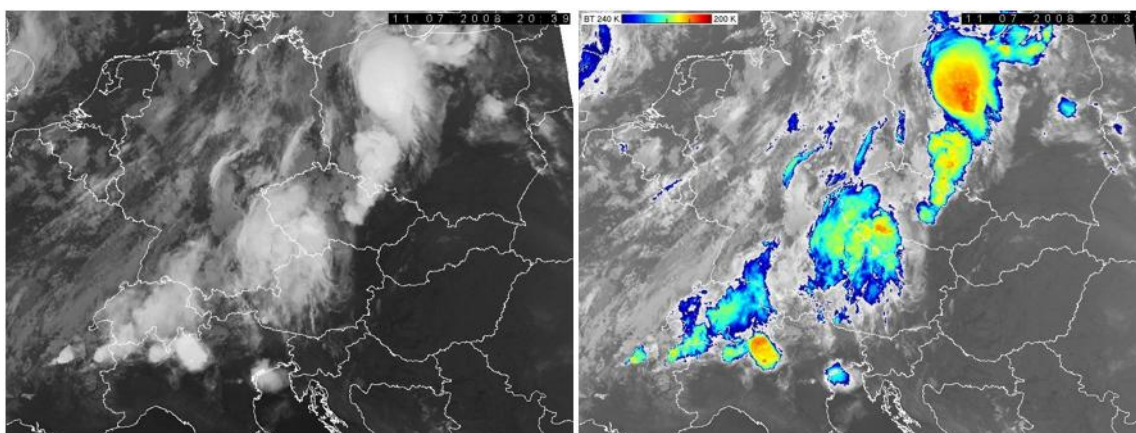
(zdroj: Novák, Setvák, 2008)

Kanál WV6.2 se často používá v kombinaci s IR10.8, kdy je počítán rozdíl v jasové teplotě (BTD, *brithness temperature difference*). Kladná diference slouží k detekci vlhkosti ve spodní stratosféře a tato metoda může být použita i pro identifikaci přestřelujících vrcholů, blíže viz. kapitola 4.3.



Obr. 4.7 Rozdíl jasových teplot na snímcích pořízených v kanálech WV6.2 a WV7.3
(MSG-1, 25. 5. 2009, 18:10 UTC (WV6.2 a WV7.3), Benelux; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

V pásmu IR atmosférického okna je detekováno pole jasové teploty, na základě kterého bývá určována výška HHO. Jde o jednu z klíčových informací vypovídající o výšce HHO. Pro opticky husté centrální partie konvektivních bouří, které se svými vlastnostmi blíží černému tělesu, stačí pro určení teploty, resp. výšky HHO pouze informace měřená jedním IR kanálem. Předpokládá se teplotní rovnováha mezi HHO a okolím bouře, specifickým případem jsou v tomto ohledu přestřelující vrcholy. Konvektivní bouře prorůstají do vysokých hladin, na snímcích v IR pásmu se proto budou jevit jako velice chladné, jak je patrné z následujícího obrázku 4.8.

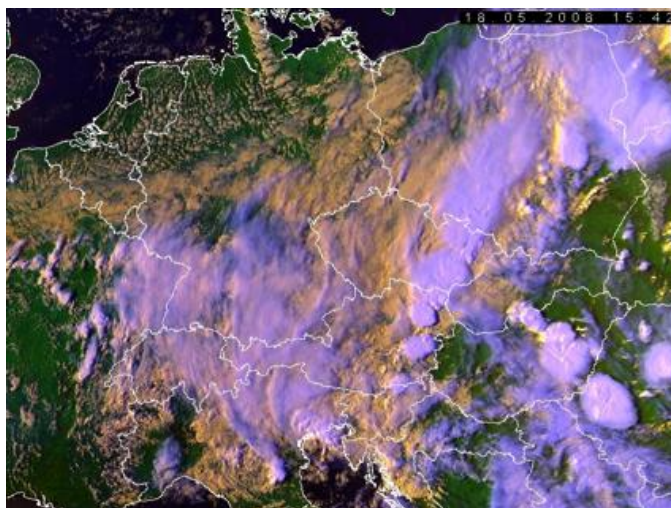


Obr. 4.8 Vzhled bouře na snímku pořízeném v IR pásmu atmosférického okna
(AVHRR NOAA 17, 11. 7. 2008, 20:39 UTC (IR 10.8), střední Evropa. Vlevo: původní snímek.
Vpravo: barevně zvýrazněné teploty od 240 do 200 K; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Na základě snímků z jednotlivých kanálů jsou konvektivní bouře dobře identifikovatelné a je možné rovněž zkoumat charakter určitých jevů vyskytujících se na

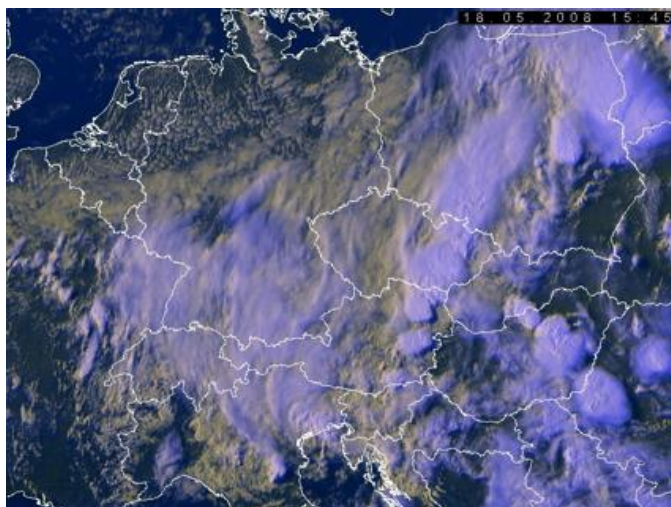
HHO bouří. V současné době je ale spíše prosazován multispektrální přístup, tedy snaha využít údaje ze všech dostupných kanálů, jelikož každý obsahuje trochu odlišné informace a pomocí jejich kombinací je možné dosáhnout nových poznatků.

Jednotlivá pásma nebo různé jejich rozdíly jsou použity v barevných kombinacích pro zvýraznění druhu oblačnosti či jejích charakteristik. Na následujících obrázcích je několik takovýchto kombinací zobrazeno. Obrázky 4.9 a 4.10 představují tradiční barevnou kombinaci, blížíci se vnímání lidským okem. Jde o kombinaci viditelného a tepelného pásma, v případě přístroje AVHRR jsou použity kanály 1-2-4, pro radiometr SEVIRI buď kombinace VIS0.6, VIS0.8 a IR10.8, nebo HRV, HRV a IR10.8. Vysoká oblačnost, tedy i cumulonimby, jsou zobrazeny modře až bíle.



Obr. 4.9 Vzhled bouře v RGB kompozitu blížícímu se vnímání lidským okem (AVHRR)

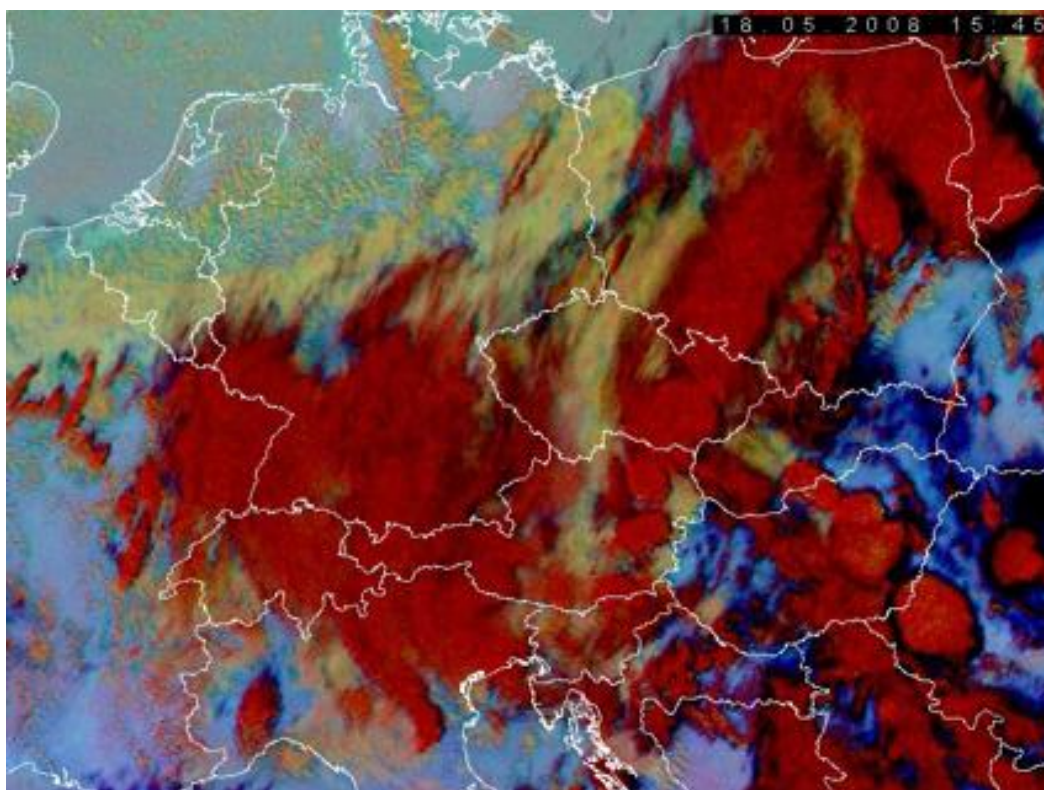
(AVHRR NOAA 15, 18. 5. 2008, 15:42 UTC (kanál 1-2-4), střední Evropa; zdroj dat: archiv ČHMÚ)



Obr. 4.10 Vzhled bouře v RGB kompozitu blížícímu se vnímání lidským okem (SEVIRI)

(MSG-1, 18. 5. 2008, 15:45 UTC (HRV-HRV-IR10.8), střední Evropa; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Mezi operativní produkty ČHMÚ patří 24-hodinový mikrofyzikální RGB produkt. Ten je vytvářen ze snímků MSG. Červená složka obsahuje (IR12.0 - IR10.8), čím je oblačnost vertikálně mohutnější, tím se jeví červenější. V zelené složce je rozdíl (IR10.8 – IR8.7), největší příspěvek modré platí pro oblačnost obsahující drobné kapky, tedy oblaka nízkého patra. Modrá složka je tvořena kanálem IR10.8, přičemž teplejší objekty jsou modřejší. Oblačnost konvektivních bouří se na těchto snímcích jeví tmavě červeně. Vzhled konvektivní bouře v této RGB kombinaci je zachycen na následujícím obrázku 4.11, doporučené škály BT a zvýraznění obrazu pro tento produkt jsou uvedeny v tabulce 4.6.



Obr. 4.11 24-hodinový mikrofyzikální produkt

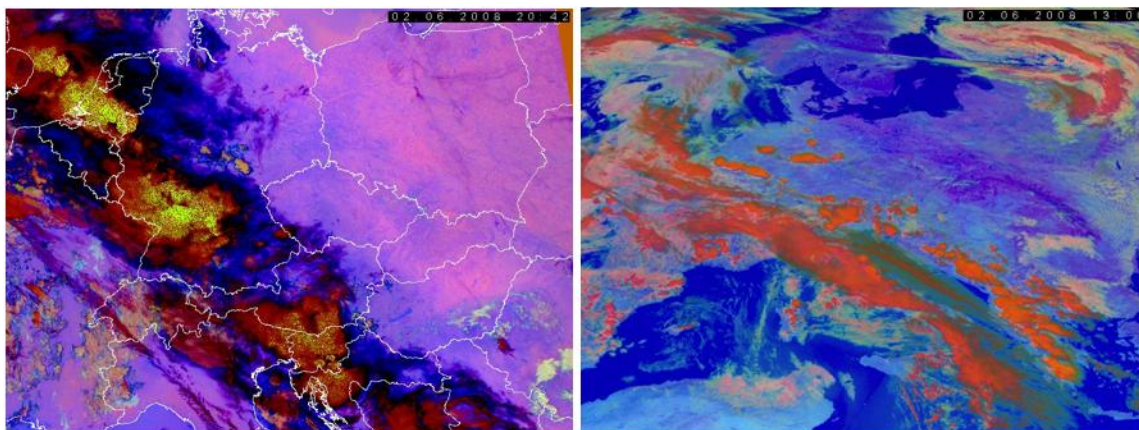
(Tatáž bouře jako na obr. 4.10, MSG-1, (IR12.0-IR10.8, IR10.8-IR8.7, IR10.8); zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Tab. 4.6 Zvýraznění obrazu doporučené pro 24-hodinový mikrofyzikální RGB produkt

Barevná složka	Kombinace kanálů (SEVIRI)	Rozsah jasových teplot	Gamma korekce
R – červená	IR12.0 – IR10.8	-4 až +2 K	1.0
G – zelená	IR10.8 – IR8.7	0 až 6 K	1.2
B - modrá	IR 10.8	248 až 303 K	1.0

(zdroj: EUMETSAT, 2006)

Kromě 24-hodinového existují ještě noční a denní mikrofyzikální produkty. V nočním je v zelené složce nahrazen rozdíl (IR10.8 – IR8.7) rozdílem (IR10.8 – IR3.9), je tedy použitelný i u snímků z radiometru AVHRR (RGB kombinace: kanál 5 – 4, kanál 4 – 3B, kanál 4). Bouřková oblačnost má obdobně tmavě červenou barvu. Kombinace VIS0.8, odrazivost v IR3.9 a IR10.8 tvoří denní mikrofyzikální produkt. Cumulonimby jsou v tomto případě zobrazeny tmavě oranžově. Příklady produktů jsou na obrázku 4.12.



Obr. 4.12 Noční a denní mikrofyzikální produkt

(Bouře z 2. 6. 2008, střední/ západní Evropa. Vlevo: AVHRR NOAA 17, 20:42 UTC (kanály 5-4, 4-3B, 4). Vpravo: MSG-1, 13:00 UTC (VIS0.8, odrazivost v IR3.9, IR10.8); zdroj dat: archiv ČHMÚ)

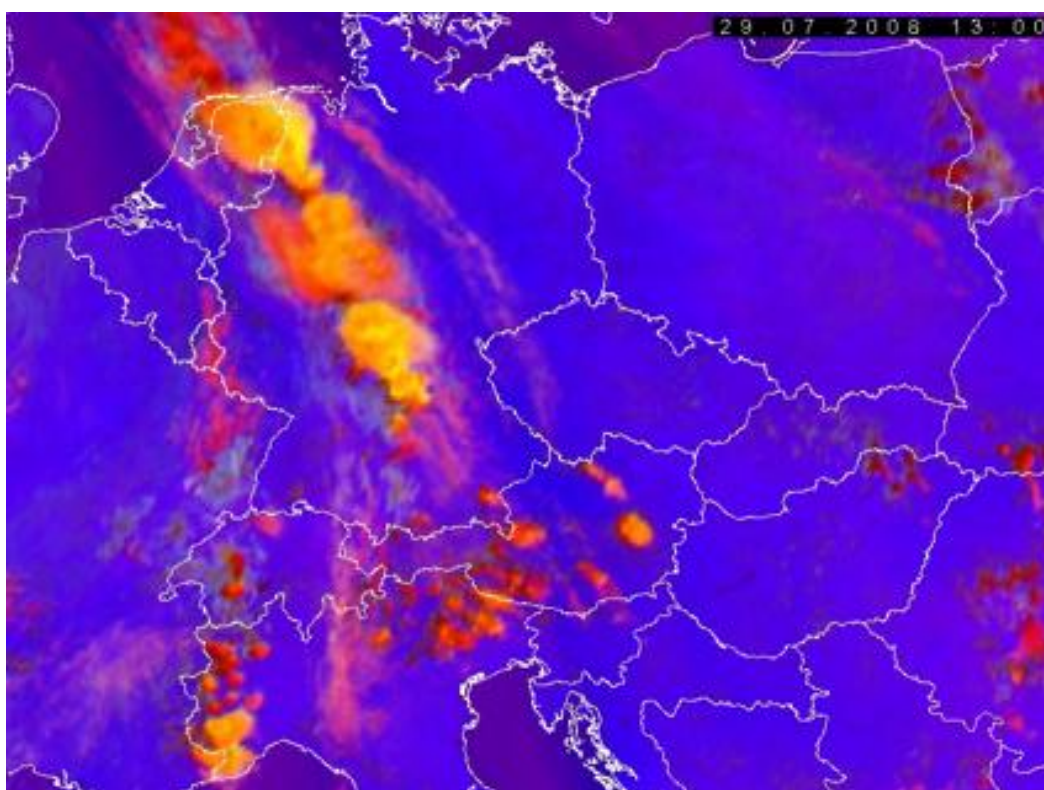
Jochen Kerkmann (EUMETSAT, 2006) vytvořil s cílem zvýraznit části HHO bouří, v nichž jsou ve větším množství přítomny drobné ledové krystalky, produkt nazývaný „Day Convective Storms“ (nebo jen „Storm“). Tyto vrcholy cumulonimbů by měly být zobrazeny výraznými odstíny žluté a mohou (ale nemusí) značit intenzivnější updrafty v oblaku, což souvisí s potenciální nebezpečností bouře (Novák, Setvák, 2008). Příklad vzhledu konvektivní bouře v této RGB kombinaci je zachycen na obrázku 4.13, doporučené rozsahy BT a korekce obrazu jsou uvedeny v tabulce 4.7. Červená složka obsahuje rozdíl kanálů WV6.2 a WV7.3, tím pádem je zdůrazněna vysoká oblačnost. Zelená (IR3.9 – IR10.8) a modrá (NIR1.6 – VIS0.6) složka jsou nastaveny tak, aby byly zvýrazněny oblasti s vyšší odrazivostí v NIR, tedy ledové krystalky.

Někdy se u této RGB kompozice může vyskytnout problém a jako bouřková oblačnost se mohou jevit i husté orografické cirry, tvořené drobnými krystalky (Novák, Setvák, 2008).

Tab. 4.7 Škály teplot a zvýraznění obrazu v RGB produktu „Storm“

Barevná složka	Kombinace kanálů (SEVIRI)	Rozsah jasových teplot	Gamma korekce
R – červená	WV6.2 – WV7.3	-35 až +5 K	1.0
G – zelená	IR3.9 – IR10.8	-5 až +60 K	0.5
B - modrá	NIR1.6 – VIS0.6	-75 až +25 %	1.0

(zdroj: EUMETSAT, 2006)

**Obr. 4.13 Konvektivní bouře zobrazené v RGB kompozici „Storm“**

(MSG-2, 29. 7. 2008 13:00 UTC (WV6.2-WV7.3, IR3.9-IR10.8, NIR1.6-VIS0.6), Německo;

zdroj dat: archiv ČHMÚ)

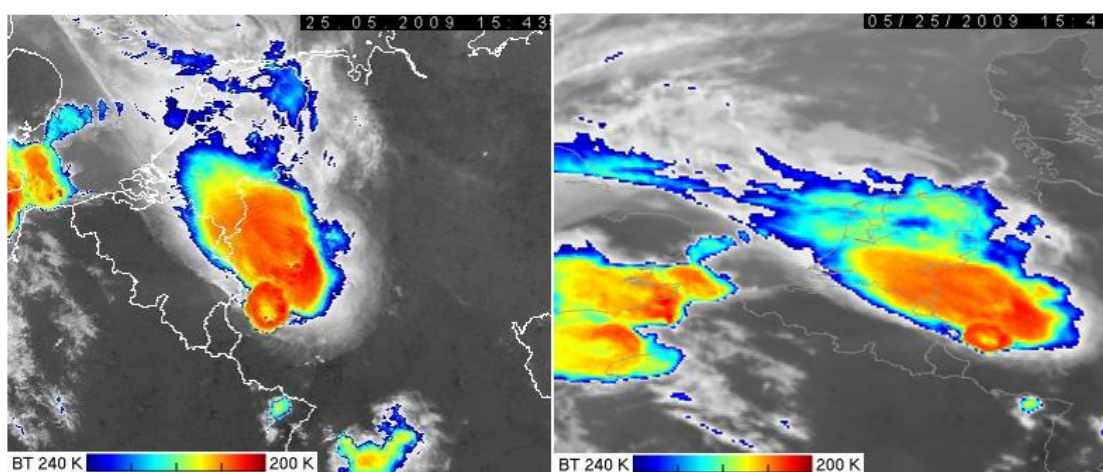
4.3 Možnosti detekce přestřelujících vrcholů

4.3.1 Identifikace vrcholů na základě jasové teploty

Detekce přestřelujících vrcholů na družicových snímcích je vzhledem k jejich charakteristikám, blíže popsaným v kapitole 3.3, nejčastěji prováděna na základě jasové teploty v tepelných pásmech atmosférického okna. Zde se projevují jako shluky nejchladnějších pixelů. Oproti horní hranici oblačnosti jejich okolí mohou rozdíly jasové teploty činit až 15 – 20 K (Setvák et al., 2008), vzhledem k různé fázi vývojového stadia však bývají na družicových snímcích zachyceny často rozdíly nižší.

Na pořízených satelitních snímcích je proto nutné přestřelující vrcholy nějakým způsobem zvýraznit. To může být provedeno například úpravami histogramu, barevným zvýrazněním pomocí pseudobarev či lokálním zvýrazněním, tedy filtrací obrazu.

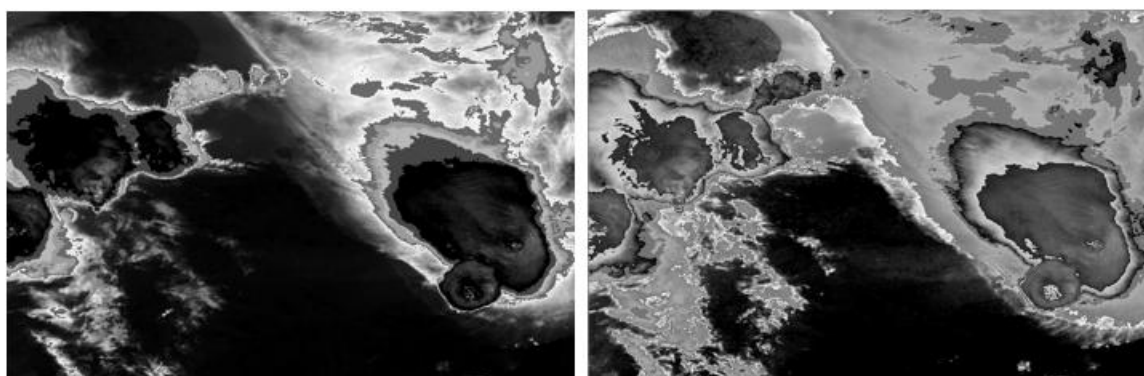
Asi nejvhodnější se jeví barevné zvýraznění pomocí vložené palety, jelikož lidské oko rozezná mnohem více barevných odstínů než úrovní šedi. Na ČHMÚ byla navrhnutá škála, která se dnes již používá standardně v rámci EUMETSATu a barevně odlišuje povrchy s jasovou teplotou 200 – 240 K, tedy studenou HHO bouří. Příklad bouře je uveden na následujícím obrázku 4.14.



Obr. 4.14 Vzhled bouře v tepelném snímku s barevně zvýrazněnou teplotní škálou

(Bouře ze dne 25. 5. 2009, Benelux. Vlevo: AVHRR NOAA 15, 15:43 UTC (kanál 4 ENH).

Vpravo: MSG-1, 25. 5. 2009, 15:45 UTC (IR10.8 ENH); zdroj dat: archiv ČHMÚ)



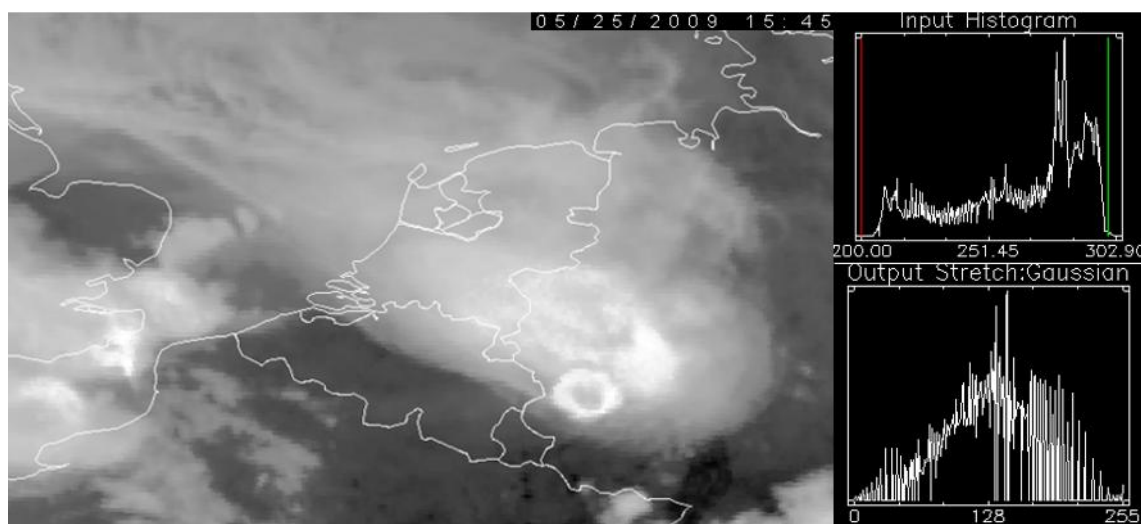
Obr. 4.15 Vzhled bouře v tepelném snímku se zvýrazněnými škálami CC a JJ (NOAA)

(Táž bouře jako na obr. 4.14, AVHRR NOAA 15, 15:43 UTC (kanál 4 ENH). Vlevo: CC algoritmus.

Vpravo: algoritmus JJ; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

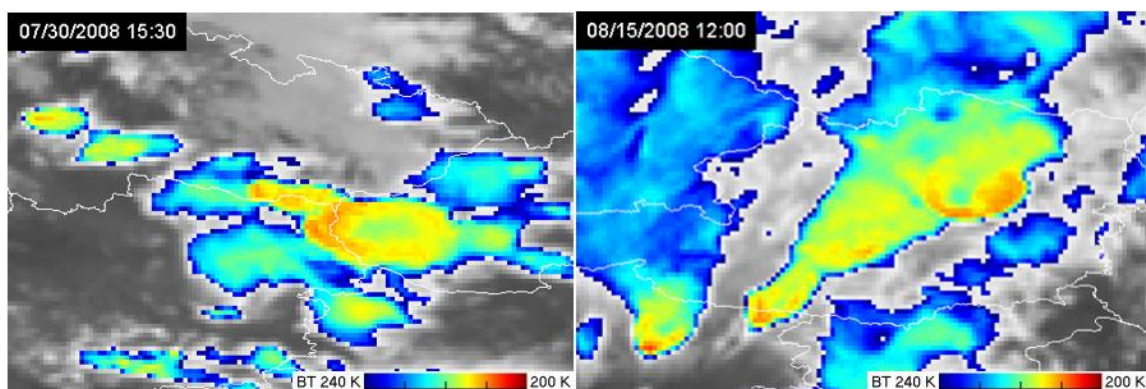
Součástí programu *HRPT Reader*, ve kterém byla zpracovávána data ve formátu *Level 1B*, je několik černobílých teplotních škál vytvořených již v 70. letech, které používají meteorologické služby Spojených států amerických. Ty mohou rovněž usnadnit detekci přestřelujících vrcholů na základě jasové teploty, příklady viz. předchozí obrázek 4.15. Více informací o jednotlivých zvýrazněních lze nalézt v nápovědě k programu.

Další eventualitou je roztažení histogramu, jako nejvhodnější se jeví jeho úprava pomocí Gaussovy fce, viz. následující obrázek 4.16, kdy jsou zvýrazněny méně četné hodnoty, v případě snímků HHO bouří jde tedy o teplotní minima. V neposlední řadě je možné použít některý z filtrů pro zvýraznění hran obrazu, jelikož se v případě přestřelujících vrcholů teplota zpravidla skokově mění. Hranové operátory je vhodné aplikovat především na data vyššího rozlišení z polárních družic.



Obr. 4.16 *Vzhled bouře v tepelném snímku – roztažení histogramu pomocí Gaussovo funkce*
(Tatáž bouře jako na obr. 4.14, MSG-1, 15:45 UTC (IR10.8 ENH); zdroj dat: archiv ČHMÚ)

V některých případech může být identifikace přestřelujících vrcholů v družicových snímcích na základě jasové teploty poměrně obtížná. Tyto případy zahrnují hlavně bouře se studenými prstenci, kde se teplotní minimum HHO bouře vyskytuje poblíž okraje kovadliny bouře. Přestřelující vrcholy zde mohou, ale také nemusí být identifikovatelné. U bouří se studeným U/V se přestřelující vrcholy vyskytují ve vrcholu tohoto U/V a bývají lépe detekovatelné. Záleží ovšem vždy na rozlišovací schopnosti radiometru a fázi vývoje přestřelujícího vrcholu. Příklady bouří se studeným prstencem a studeným U/V v tepelných snímcích jsou na obrázku 4.17.



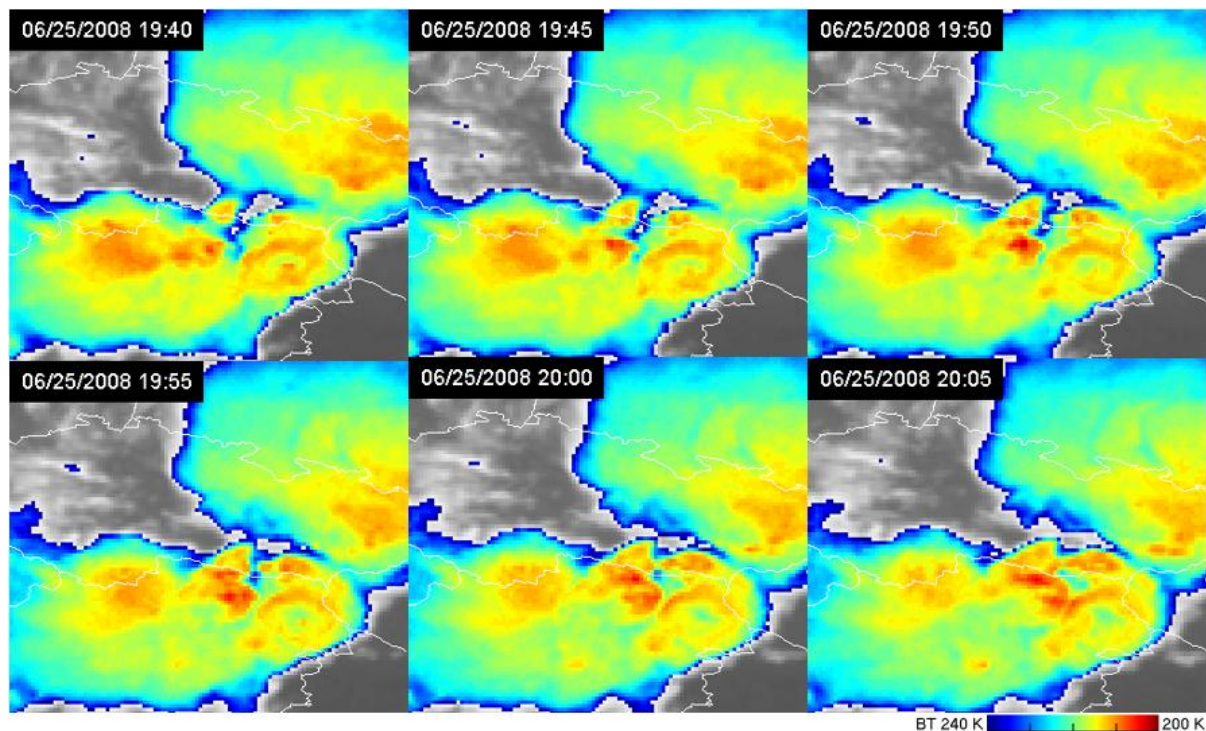
Obr. 4.17 Vzhled bouří se studeným prstencem a studeným U/V v tepelném snímku

(Vlevo: bouře se studeným prstencem, MSG-1, 30. 7. 2008, 15:30 UTC (IR10.8 ENH), střední Evropa.

Vpravo: bouře se studeným U/V, MSG-1, 15. 8. 2008, 12:00 UTC (IR10.8 ENH), střední Evropa;

zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Jak již bylo zmíněno, problémy při interpretaci satelitních snímků teplotního pole HHO způsobuje čas a periodicitu snímání družice vzhledem k vývojovému stadiu přestřelujících vrcholů. Jejich vývoj v rámci části jedné konvektivní situace je demonstrován na následující sérii snímků pořízených v 5-minutovém režimu MSG-1 RSS (obr. 4.18).



Obr. 4.18 Série snímků v tepelném pásmu zachycující vývoj přestřelujících vrcholů

(MSG-1, 25. 6. 2008, 19:40 UTC až 20:05 (IR10.8 ENH), střední Evropa; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

4.3.2 Další možnosti detekce přestřelujících vrcholů

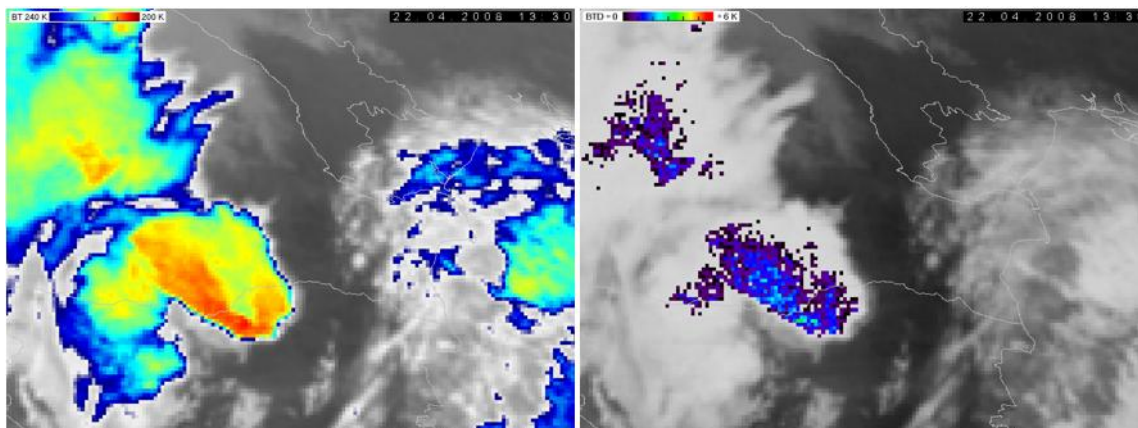
Kromě identifikace přestřelujících vrcholů na základě minimální jasové teploty na snímcích z jednoho kanálu v tepelném pásmu atmosférického okna existují další algoritmy, které mohou být vhodné pro jejich detekci. Stručný přehled byl podán v kapitole 2.2.

V případě metody *brithness temperature difference* (BTD), popsané v četné literatuře (Fritz, Laszlo, 1993; Ackerman, 1996; Schmetz et al., 1997; Setvák et al., 2007), je počítán rozdíl v jasové teplotě mezi pásmy vodní absorpce ($\sim 7 \mu\text{m}$) a atmosférického okna ($\sim 11 \mu\text{m}$). Předpokládá se, že přestřelující vrcholy by se měly projevovat nejvyššími kladnými rozdíly. Algoritmus vychází z několika předpokladů:

- teplota ve spodní stratosféře roste s výškou,
- přenos vodní páry do spodní stratosféry se uskutečňuje prostřednictvím silných výstupných proudů souvisejících s přestřelujícími vrcholy,
- vyzařování teplejší vodní páry ve spodní stratosféře je zachyceno v kanálech vodní páry, oproti tomu IR kanály atmosférického okna zaznamenávají záření chladnější HHO bouří.

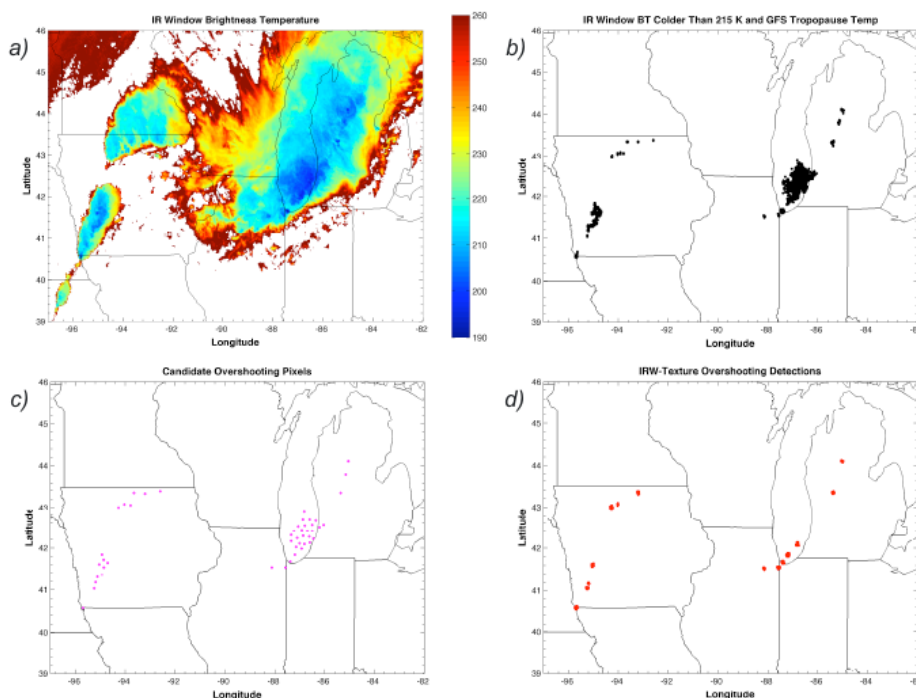
Na základě těchto úvah by v místech, kde se vyskytují přestřelující vrcholy, měly být detekovány kladné rozdíly jasových teplot mezi těmito spektrálními pásmy. Metoda však není zcela spolehlivá. Zaprvé není známa tloušťka LSM (*lower stratospheric moisture*) vrstvy a v případě nejvyšších přestřelujících vrcholů může být poměrně tenká a nepřispívat výrazně k celkovému detekovanému záření. Přestože nízké hodnoty BT (IR10.8) a kladné rozdíly BTD (WV6.2 - IR10.8) spolu zpravidla prostorově korelují (obr. 4.19), může dojít v důsledku advekce k posunu této stratosférické vlhkosti mimo oblast přestřelujícího vrcholu. Navíc kladné rozdíly BTD mohou být vysvětlovány i jinými způsoby, nicméně vždy závisí použitelnost metody na profilech teploty ve spodní stratosféře.

Podobně jako rozdíl BTD (WV6.2 - IR10.8) bývá používán rozdíl pásma absorpce CO_2 (IR13.4 - IR10.8) pro výpočet tlaku na horní hranici oblačnosti a tudíž i její výšky (Štástka, Setvák, 2008). Metoda může být využita i pro identifikaci přestřelujících vrcholů. Ty jsou kromě toho v některých případech dobře detekovatelné i na snímcích ve viditelném spektru, což může sloužit pro validaci výsledků ostatních metod. Berendes et al. (2008) toto pásmo zahrnuje rovněž do klasifikačního algoritmu.



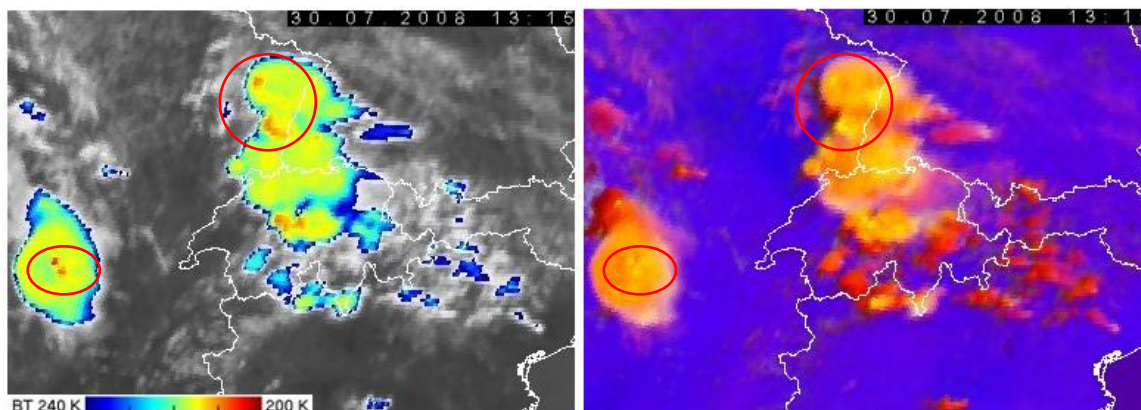
Obr. 4.19 Přestřelující vrcholy na snímku v tepelném pásmu a odpovídající rozdíl BTD
(MSG-2, 22. 4. 2008, 13:30 UTC, Rumunsko. Vlevo: BT (IR10.8 ENH). Vpravo: BTD (WV6.2- IR10.8);
zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Brunner et al. (2007) či Bedka et al. (2010) se zabývají detekcí přestřelujících vrcholů na základě teplotních gradientů. Na snímcích jsou identifikována teplotní minima nižší než určitá prahová hodnota, teploty kovadlin bouří a spočítány teplotní rozdíly. Zároveň jsou brány v úvahu maximální historicky pozorované průměry přestřelujících vrcholů (12 km). Jako přestřelující vrcholy jsou klasifikovány takové shluky pixelů, které splňují autory daná kritéria (obr. 4.20).



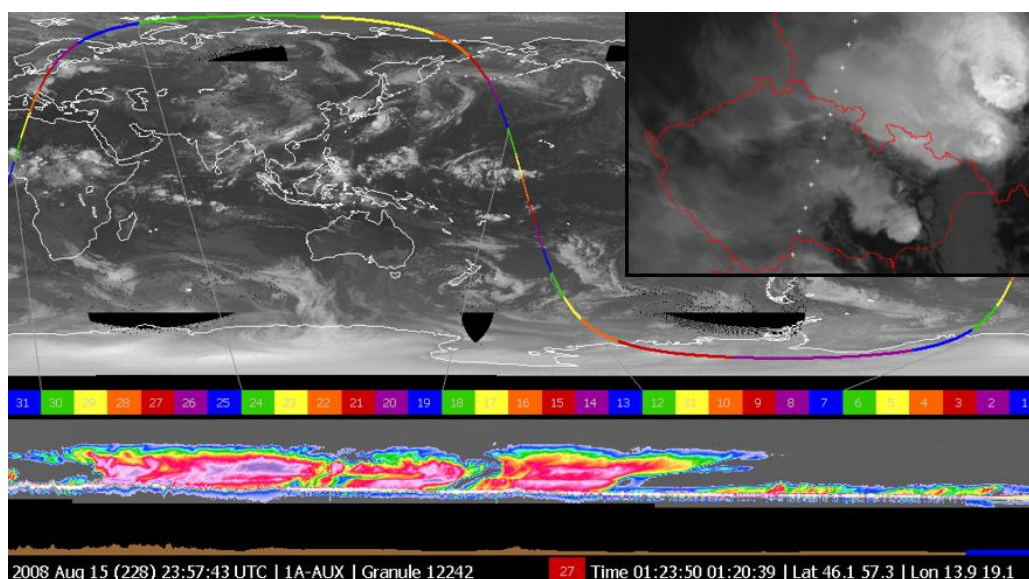
Obr. 4.20 Detekce přestřelujících vrcholů dle metody „IRW-texture“ (Bedka et al., 2010)
(MODIS Aqua, 18. 6. 2008, 18:35 UTC, USA. Obr. a) Zvýrazněný kanál 31. Obr. b) Pixely s BT < 215 K.
Obr. c) Potenciální OT dle metody „IRW-texture“. Obr. d) Detekované OT; zdroj: Bedka et al., 2010)

Někdy je možné detekovat přestřelující vrcholy v RGB kombinaci „Storm“, pokud jsou zvýrazněny oblasti intenzivních updraftů (obr. 4.21). Tento operativní produkt byl popsán již v dřívějším textu.



Obr. 4.21 OT bouří na snímku v tepelném pásmu a odpovídající RGB kombinace „Storm“ (MSG-2, 30. 7. 2008, 13:15 UTC, západní Evropa. Vlevo: BT (IR10.8 ENH). Vpravo: RGB kombinace „Storm“ (WV6.2-WV7.3, IR3.9-IR10.8, NIR1.6-VIS0.6); zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Ideálním nástrojem pro určení výšky přestřelujících vrcholů a dalších charakteristik bouří je např. radar CPR nesený družicí CloudSat. Jelikož ale tento přístroj snímá pouze úzký pás povrchu (rozlišení 1,4 km v příčném směru) podél dráhy letu, je pravděpodobnost, že bude zachycen profil určitou konvektivní bouří, poměrně nízká. Jeden z přeletů přes okrajovou část kovadliny bouře je uveden na obrázku 4.22.



Obr. 4.21 Snímek okrajové části kovadliny bouře pořízený přístrojem CPR (CloudSat) (15. 8. 2008, 01:23 UTC, střední Evropa; zdroj: archiv ČHMÚ)

5. METODIKA ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT

5.1 Použitá data a software

Data použitá pro potřeby práce pocházejí z archivu družicového oddělení Českého hydrometeorologického ústavu. Byly vybrány významné konvektivní situace, které se vyskytly nad Evropou v roce 2008, jeden ukázkový případ silných konvektivních bouří pochází z roku 2009. Kvůli účelu práce bylo nutné, aby byla bouře zachycena vždy alespoň jednou z operativních meteorologických družic vyskytujících se na polární dráze. Přehled situací včetně dne a oblasti výskytu a toho, jaká data byla analyzována, je uveden v tabulce 5.1.

V rámci práce byly zpracovávány snímky pořízené přístrojem SEVIRI (MSG) a porovnávány se snímky z radiometrů AVHRR (družice NOAA/POES, MetOp) nebo MODIS (družice EOS Terra a Aqua). Snímky z geostacionárních družic MSG jsou ve formátu *XPIF*, což je interní formát dat generovaných softwarem firmy VCS, od které má ČHMÚ družicový systém. Analyzované snímky zobrazují výřez Evropy a byly pořízeny v tzv. rapid-scan režimu (MSG RSS, *Rapid Scan Service*), kdy je skenována pouze omezená část zemského disku. V tomto režimu od května 2008 operuje družice MSG-1, která byla přesunuta na 9,5° východní zeměpisné délky. 5-minutová periodičita snímání je výrazně vhodnější pro monitoring vývoje přestřelujících vrcholů, než standardní 15-minutová data.

Snímky z polárních družic byly k dispozici ve formátu *Level 1B*, obsahují tedy informace potřebné ke kalibraci dat na odrazivost, resp. jasovou teplotu a údaje pro georeferenci. Tato data prošla kontrolou kvality (Goodrum et al., 2009). Kromě toho byly snímky z družic NOAA dodány i ve formátu *XPIF*, ve kterém jsou uchovávány v ČHMÚ. Vedle archivních dat ČHMÚ je možné data z družic NOAA získat z elektronického on-line archivu této instituce označovaného jako CLASS (*Comprehensive Large Array-data Stewardship System*). Náhledové mapy (od roku 1978), které umožňují nalezení potřebných datových souborů, jsou bezplatně uveřejňovány na webových stránkách přijímací stanice Dundee (<http://www.sat.dundee.ac.uk/>), odkud je rovněž možné (oproti poplatku) získat data v několika formátech, včetně *Level 1B*.

Vliv geometrické rozlišovací schopnosti družice byl hodnocen vzhledem k minimální detekované jasové teplotě, a to v pásmu IR atmosférického okna odpovídající vlnovým délkám $\sim 11 \mu\text{m}$. Toto pásmo se shoduje s kanály IR10.8 (kanál 09, SEVIRI), kanál 4 (AVHRR) a kanál 31 (MODIS). Pro zpracování však byla k dispozici data ze všech kanálů jednotlivých přístrojů, protože je možné je využít pro snadnější a přesnější detekci přestřelujících vrcholů. Snímky z družic MSG pořízené přístrojem SEVIRI zachycují celé období vývoje konvektivní bouře, jedná se tedy o velké množství dat pokrývající dobu několika hodin až dnů. To umožňuje zkoumat časovou variabilitu minimálních detekovaných teplot HHO jednotlivých bouří.

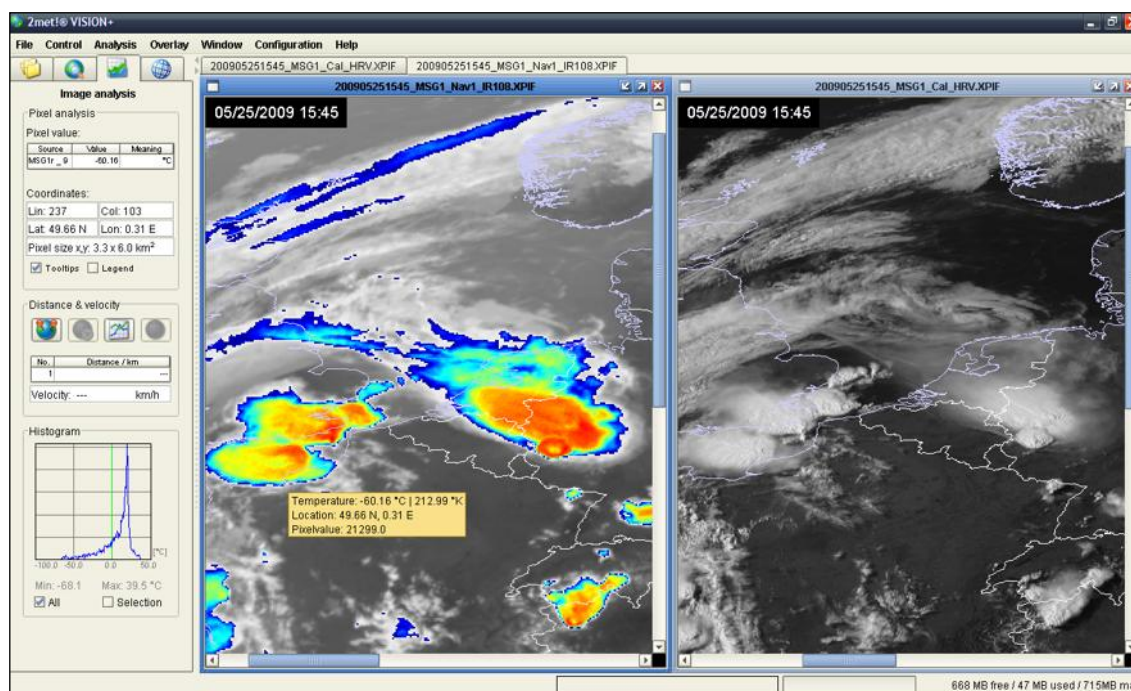
Tab. 5.1 Konvektivní bouře zpracovávané v rámci této práce

Datum výskytu	Hlavní oblast výskytu	Dostupná data	
		MSG	Polární družice
19.5.2008	východní Evropa	MSG-1 RSS	NOAA-15,17
20.5.2008	Maďarsko, Rumunsko	MSG-1 RSS	NOAA-15,16,18
28.5.2008	Bulharsko, Rumunsko	MSG-1 RSS	NOAA-15
29.5.2008	Německo	MSG-1 RSS	NOAA-15,16,17,18
31.5.2008	střední Evropa	MSG-1 RSS	NOAA-15,17,18, MetOp
1.6.2008	střední Evropa	MSG-1 RSS	NOAA-15,17
25.6.2008	ČR, Německo, Rakousko	MSG-1 RSS	NOAA-15,17
12.7.2008	ČR, Polsko, Bělorusko	MSG-1 RSS	NOAA-15
13.7.2008	střední a východní Evropa	MSG-1 RSS	NOAA-15
14.-15.7.2008	východní Evropa	MSG-1 RSS	NOAA-17,18
1.8.2008	severní Itálie, Německo	MSG-1 RSS	NOAA-15,17
18.-20.8.2008	Rusko	MSG-1 RSS	NOAA-18
4.9.2008	Středomoří, Francie	MSG-1 RSS	NOAA-17
26.10.2008	Středomoří	MSG-1 RSS	NOAA-15,17,18, MetOp
6.-7.11.2008	Středomoří	MSG-1 RSS	NOAA-15,16,17,18, Aqua
25.-26.5.2009	Benelux, Francie, Německo	MSG-1 RSS	NOAA-15,16,17,18, MetOp, Terra

(zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Vzhledem k nesterijným formátům použitých dat byly pro zpracování použity různé programy. Od firmy VCS byl bezplatně zapůjčen software *2met!® Vision+*, který je vhodný pro zpracování a vizualizaci dat ve formátu *XPIF*. Program umožňuje zobrazení a jednoduché analýzy snímků včetně jejich animací. Pro vizualizaci dat a zvýraznění určitých jevů jsou na výběr různé barevné palety či úpravy histogramu. Do zobrazení je možné přidat vektorové vrstvy např. obrysy kontinentů či státních hranic. Data jsou zachována v původní družicové projekci. Pro každý obrazový element se zobrazují informace o poloze a geometrickém rozlišení. V případě tepelných snímků z MSG jsou data automaticky kalibrována na jasovou teplotu, pro družice NOAA jsou

zachovány původní radiometrické hodnoty jednotlivých obrazových elementů. U snímků pořízených radiometrem AVHRR je zobrazován i čas snímání určitého pixelu a to s přesností na tisíce sekund. Zpracování snímků v tomto programu je ukázáno na následujícím obrázku 5.1.

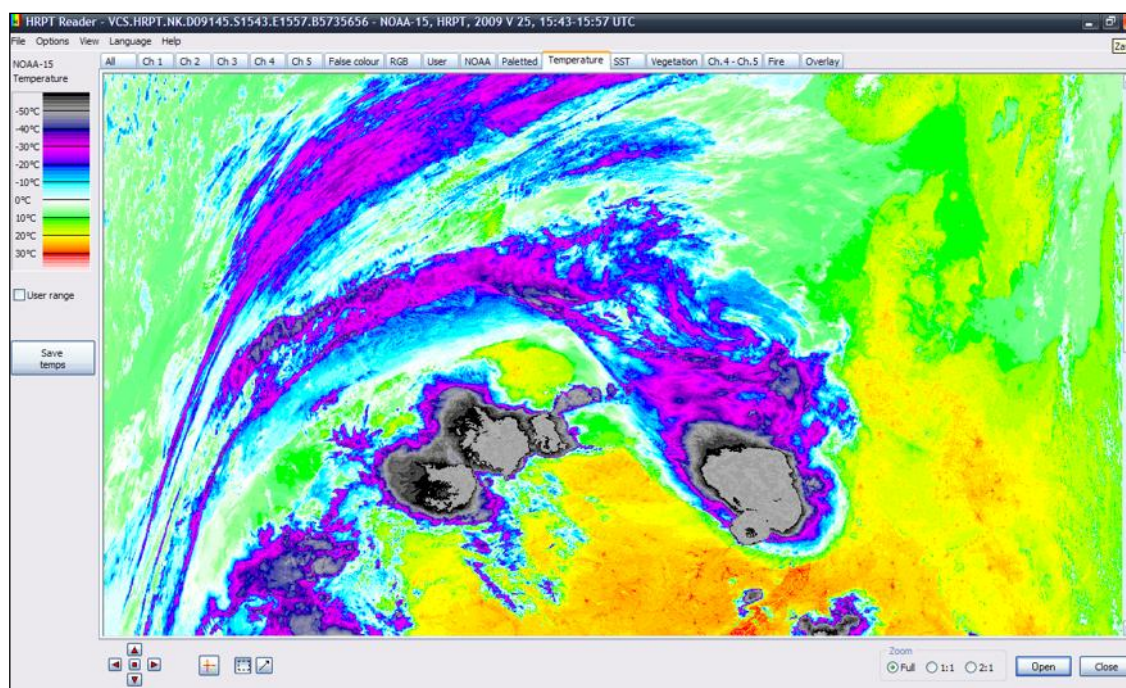


Obr. 5.1 Příklad zpracování snímků v programu 2met!® Vision+

(MSG-1, 25. 5. 2009 15:45 UTC, Benelux. Vlevo: IR10.8 ENH. Vpravo: HRV; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Dalším použitým programem byl *HRPT Reader* vyvinutý Davidem Taylorem, který je k dispozici zdarma v částečně omezené verzi (především pro výukové účely), resp. komerčně v plné verzi. Software je určený zejména pro zobrazování a zpracování dat z družic NOAA, nově je zahrnuta také možnost načtení snímků z evropské družice MetOp. Software rovněž pracuje s formátem *Level 1B* (a několika dalšími formáty). *HRPT Reader* umožňuje úpravy obrazu pomocí předdefinovaných funkcí zvýraznění či tvorby barevných syntéz v pravých i nepravých barvách. Dále obsahuje různé algoritmy pro přípravu jednoduchých produktů, např. nástroje pro zobrazení jasové teploty zemského povrchu či oblačnosti, teploty mořské hladiny, stavu vegetace (vegetační index NDVI) nebo detekci ohně. Kromě toho je součástí programu několik černobílých teplotních stupnic, využívaných pro identifikaci různých druhů oblačnosti. Pro každý obrazový element jsou opět dostupné informace o jasové teplotě, zeměpisné poloze a času snímání. Příklad výstupu z tohoto software je zobrazen na obrázku 5.2.

Složitější analýzy snímků byly zpracovány v software *IDL/ENVI* firmy ITT Visual Information Solutions. Byly zde vyzkoušeny rozdíly pásem a různé RGB kombinace a geometrická transformace obrazu z družicové projekce do některých geografických projekcí, která však v rámci této práce slouží pouze pro potřeby vizualizace. Tento program také jako jediný z uvedených umožňuje načtení a kalibraci snímků pořízených přístrojem MODIS. Import a zpracování ostatních datových souborů (SEVIRI, AVHRR) je také možný díky přidaným utilitám vytvořeným na ČHMÚ.



Obr. 5.2 Příklad výstupu v software *HRPT Reader*

(Táž bouře jako na obr. 5.1, AVHRR NOAA 15, 15:43 UTC (kanál 4 ENH); zdroj dat: archiv ČHMÚ)

5.2 Korekce vstupních dat

5.2.1 Radiometrické korekce vstupních dat

Radiometrické korekce vstupních dat jsou nutným předpokladem pro jejich následnou analýzu. Hlavní náplní práce je zpracování snímků pořízených v IR kanále atmosférického okna. Není proto nutné provádět korekce dat na výšku Slunce, kdy je odstraněn vliv různého úhlu dopadajících paprsků pro různá místa pořízené scény. Rovněž odpadá potřeba oprav vyplývajících z geometrie letu a stavu atmosféry. Sledovaná HHO bouří se nachází ve velkých výškách, zpravidla blízko úrovně tropopausy nebo nad ní. Efekty atmosféry jsou tudíž zanedbatelné.

Radiometrická korekce tedy zahrnovala kalibraci z relativního tvaru bezrozměrných čísel na jasovou teplotu. Původní přijatá data totiž nemají žádný fyzikální rozměr a jednotlivé pixely nabývají hodnot dle radiometrické rozlišovací schopnosti přístrojů a použitého kódování – snímky pořízené radiometrem AVHRR jsou 10bitové (hodnoty 0-1023), přístrojem MODIS 12bitové (hodnoty 0-4095) a formát *XPIF* dat z družic MSG je 16bitový (hodnoty 0-65535).

Kalibrace družicových dat je založena na vztahu mezi číselnými hodnotami zaznamenanými radiometrem a spektrální intenzitou záření. Intenzita záření je v případě tepelných kanálů posléze převedena na jasovou teplotu. Kalibrační vztah je získán během kalibrace detekčního systému. Před vypuštěním družice je prováděna pozemní kalibrace přístrojů. Ve speciálních komorách je radiometr vystavován záření několika kalibračních těles, které se blíží vlastnostem absolutně černého tělesa. Teplota těchto cílů je zjišťována platinovými termometry (*PRT, Platinum Resistance Thermometer*), na základě teplot je spočítána intenzita záření a odvozen kalibrační vztah. Během operativního provozu jsou přístroje rovněž kalibrovány. Kromě zemského povrchu je zaměřován interní kalibrační cíl, který je součástí konstrukce radiometru, resp. chladný kosmický prostor. Více informací o kalibraci přístrojů je možné nalézt na stránkách organizací EUMETSAT (EUMETSAT, 2007) či NOAA (Goodrum et al., 2009). Kalibrace radiometru MODIS je podobná kalibraci AVHRR.

Odezva radiometru nebývá lineární. V případě radiometru SEVIRI je provedena linearizace a závislost mezi intenzitou záření B_λ a hodnotou *Pixel Count* je dána vztahem:

$$B_\lambda = Cal_Offset + (Cal_Slope \cdot Pixel\ Count), \quad (5.1)$$

kde konstanty Cal_Offset a Cal_Slope jsou pro každý kanál uvedeny mezi kalibračními údaji. Jasová teplota BT je poté určena na základě inverzní Planckovy funkce (EUMETSAT, 2007):

$$\frac{10^4}{\lambda_0} = \nu, \quad BT = \frac{c_2 \nu}{\ln \left[1 + \frac{\nu^3 c_1}{B_\lambda} \right]}, \quad (5.2)$$

kde λ_0 značí střední hodnotu vlnové délky v rámci určitého kanálu, c_1 a c_2 jsou radiační konstanty ($c_1 = 1,191 \cdot 10^{-5} \text{ mW}(\text{cm}^{-1})^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $c_2 = 1,439 \text{ cm} \cdot \text{K}$). Číslo ν [cm^{-1}]

(*wavewnumber*) je používáno hlavně v anglické literatuře, v české (např. Řezáčová et al. 2007) jsou vztahy uvedeny s vlnovou délkou λ . V tom případě pak jsou i radiační konstanty vyjádřeny v odlišných jednotkách (c_1 [$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$], c_2 [$\text{m} \cdot \text{K}$]).

Pro termální kanály přístroje AVHRR je od startu družice NOAA-15 používán nelineární vztah mezi intenzitou vyzařování B_λ a obrazovými hodnotami (*Pixel Count*, zde používáno označení C_E) (Goodrum et al., 2009):

$$B_\lambda = a_0 + a_1 C_E + a_2 C_E^2. \quad (5.3)$$

Parametry a_0 , a_1 , a_2 jsou součástí kalibračních údajů. Ve výpočtu jasové teploty figurují kromě hodnoty ν ještě další dva kalibrační koeficienty – A a B :

$$BT^* = \frac{c_2 \nu}{\ln \left[1 + \frac{\nu^3 c_1}{B_\lambda} \right]}, \quad BT = \frac{BT^* - A}{B}. \quad (5.4)$$

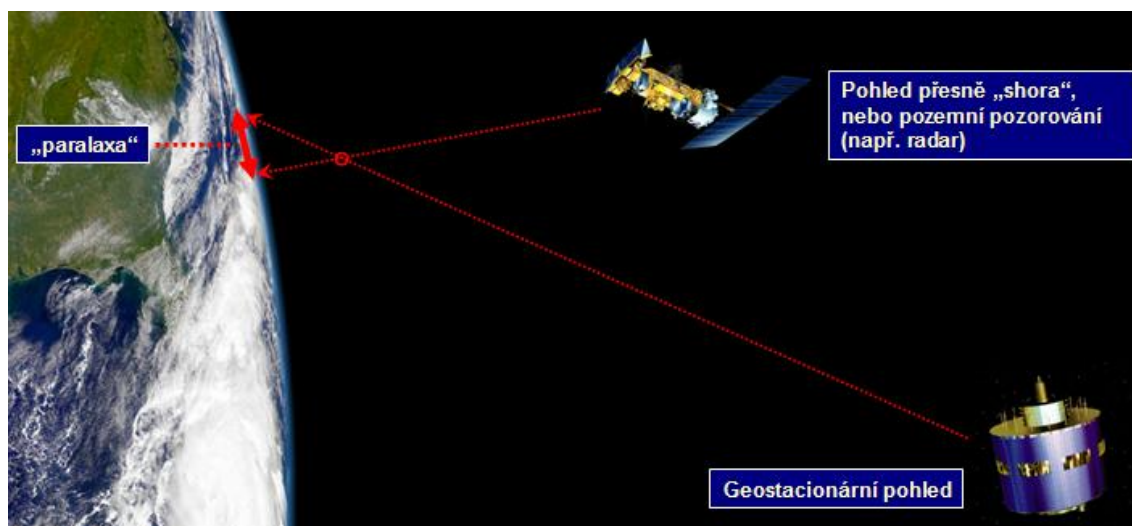
Kalibrace dat na jasovou teplotu je v uvedených programech (*HRPT Reader*, *2met!® Vision+*) prováděna automaticky, v případě zpracování dat z MODISu v software *IDL/ENVI* je nutné aplikovat funkci *Load Temperature* (utilita *Preprocessing*). V příloze č. 2 je uvedena část dokumentu obsahujícího údaje o snímku včetně těch nutných pro jeho georeferenci a kalibraci (funkce programu *HRPT Reader*).

5.2.2 Geometrická korekce vstupních dat

Původní předpoklad byl, že budou provedeny rovněž geometrické korekce zpracovávaných dat, aby bylo možné sloučit snímky pořízené různými družicemi a pomocí určité funkce vypočítat rozdíly jasových teplot v oblastech, kde se vyskytují přestřelující vrcholy. Je však nutné si uvědomit několik aspektů. Při georeferenci snímků do některé z kartografických projekcí jsou převzorkována data do korigované matice. Jsou vypočteny nové hodnoty pixelu (bilineární interpolace či kubická konvoluce), případně převzaty hodnoty z nejbližšího obrazového elementu (metoda nejbližšího souseda), jevy v novém obraze však mohou být prostorově mimo až o polovinu pixelu. Obojí je pro potřeby práce nežádoucí.

Další problém představuje paralaxa (geometrie snímání vzhledem k ortogonálnímu pohledu), a to zvláště u dat z družic na geostacionární dráze, ale také

u družic polárních na krajích skenovaného pásu. Sledovaná HHO bouří se totiž nachází ve výškách cca 10 až 15 kilometrů nad zemským povrchem, což není zanedbatelné, a její projekce na zemský povrch je závislá na této výšce a geometrii snímání družice (obr. 5.3). Navíc není možné vypočítat přesnou hodnotu paralaxy, protože neznáme exaktní výšku HHO bouří a přestřelujících vrcholů. Tento posun však může činit až několik desítek kilometrů (Radová, Seidl, 2008).



Obr. 5.3 Paralaxa

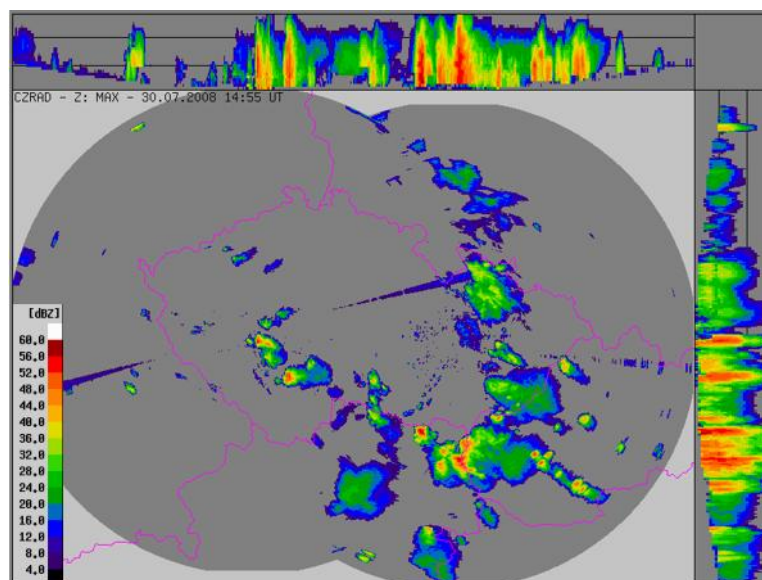
(zdroj: Novák, Setvák, 2008)

5.3 Detekce přestřelujících vrcholů

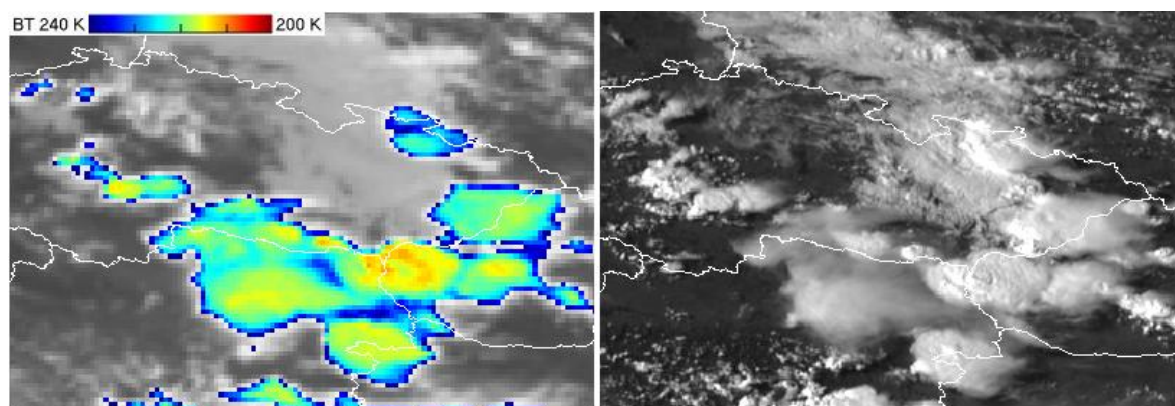
Přestřelující vrcholy byly identifikovány především na principu jasové teploty, která by měla zpravidla u tohoto jevu dosahovat nižších hodnot než v ostatních částech HHO bouře. Jasová teplota byla získána z dat spektrálních kanálů IR10.8 (kanál 09, SEVIRI), kanál 4 (AVHRR) a kanál 31 (MODIS). V rámci jednoho snímku se často vyskytlo více přestřelujících vrcholů. Buď se jednalo o větší počet ojedinělých konvektivních cel, nebo o rozsáhlou bouři, která se při pohledu ze satelitů mohla jevit jako jedna velká bouře, ve skutečnosti však šlo o multicelární systém. Vhodné je proto sledovat obrázky radiolokačních odrazivostí (obr. 5.4), pokud jsou pro určitý případ bouře k dispozici. Nejvyššími odrazivostmi jsou charakterizována jádra bouří, nad nimiž se zpravidla přestřelující vrcholy vyskytují.

V případě, že byl některý z přestřelujících vrcholů v těchto, určitým způsobem zvýrazněných snímcích (viz. kapitola 4.3.1) špatně rozpoznatelný, byly zkoumány

možnosti jeho detekce na snímcích pořízených ve viditelném spektru (obr. 5.5). Pokud možno na snímcích s vyšším rozlišením. Kromě toho byla vytvořena např. RGB kompozice blížíící se vnímání lidským okem, dále je možné vyzkoušet produkt „Storm“ či rozdíl BTD (WV6.2 - IR10.8), viz. obr. 5.6.



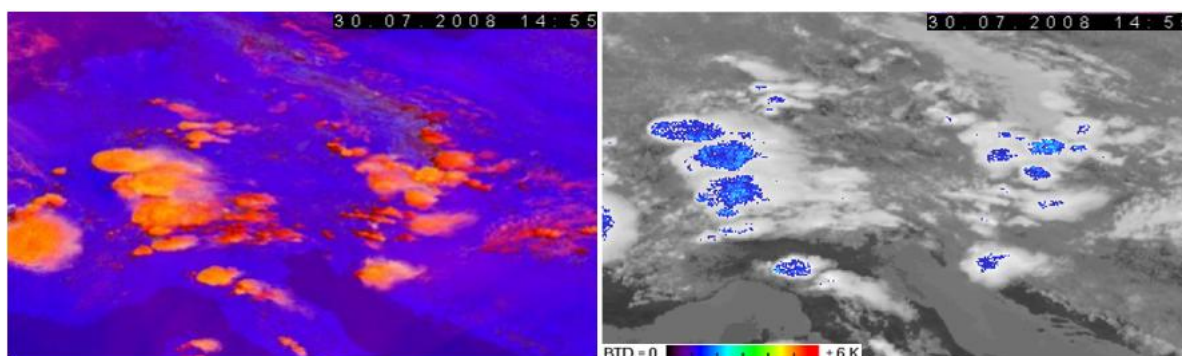
Obr. 5.4 Využití radiolokačních odrazivostí pro identifikaci přestřelujících vrcholů
(Bouře z 30.7. 2008, 14:55 UTC, střední Evropa, radarová síť CZRAD; zdroj dat: archiv ČHMÚ)



Obr. 5.5 Srovnání možnosti identifikace OTs v tepelném a viditelném pásmu (HRV)
(MSG-1, 30. 7. 2008, 14:55 UTC, střední Evropa. Vlevo: BT (IR10.8 ENH). Vpravo: HRV;
zdroj dat: archiv ČHMÚ)

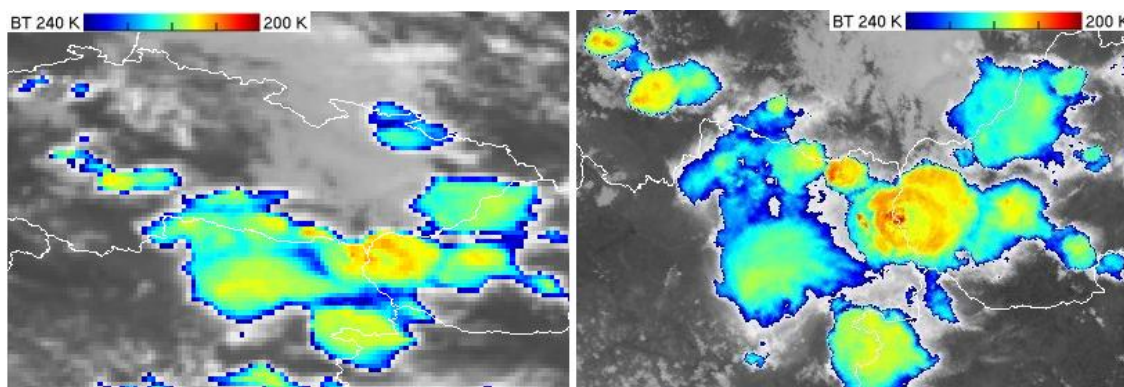
Každopádně je vhodné se snažit nejprve detekovat přestřelující vrcholy na snímcích pořízených polárními družicemi kvůli lepšímu geometrickému rozlišení (obr. 5.7) a teprve poté se pokusit o totéž na snímcích z MSG. V případě obtížného

rozpoznání vrcholů v určitém snímku je také možné sledovat jejich vývoj v několika po sobě následujících snímcích (data pořízená režimem MSG RSS).



Obr. 5.6 Další použitelné metody pro detekci přestřelujících vrcholů

(Tatáž bouře jako na obr. 5.4. Vlevo: „Storm“. Vpravo: BT-D (WV6.2- IR10.8); zdroj dat: archiv ČHMÚ)



Obr. 5.7 Vliv geometrického rozlišení přístroje na detekci přestřelujících vrcholů

(Tatáž bouře jako na obr. 5.4. Vlevo: MSG-1, 14:55 UTC (IR10.8 ENH). Vpravo: AVHRR NOAA 15, 14:57 UTC (kanál 4 ENH); zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Pokud pro některé bouře i přes výše uvedené způsoby nebylo možné přestřelující vrcholy rozpoznat, nebyly tyto do výsledků zahrnuty. Účelem práce není detekovat všechny přestřelující vrcholy, ale snažit se zhodnotit vliv geometrického rozlišení radiometrů alespoň na vzorku dostupných dat.

5.4 Čas snímání přestřelujících vrcholů

Vyhodnocení vlivu rozlišovací schopnosti meteorologických družic na detekci přestřelujících vrcholů je závislé také na rozdílu časů jejich snímání. Doba existence

tohoto jevu je zpravidla 5 – 15 minut (Setvák et al., 2008b), proto je důležité, aby tento rozdíl byl co nejmenší.

Radiometry nesené polárními družicemi skenují rovnoměrně po řádcích daný pás zemského povrchu vymezený určitým zorným polem. Řádky jsou kolmé na dráhu letu. V případě dat pořízených přístrojem AVHRR se čas snímání jednotlivých obrazových elementů zobrazuje v programu *HRPT Reader* i v rámci software *2met!® Vision+* a je v obou případech udáván v tisícinách sekundy.

U snímků ze zařízení MODIS je nutné tento údaj dopočítat. K tomu je zapotřebí znát:

- počátek času snímání určité obrazové granule (údaj obsažen v názvu souboru),
- dobu skenování tohoto snímku (5 minut)
- směr letu družice (dle orientace snímku či zjistitelné např. z archivu přijímací stanice Dundee (<http://www.sat.dundee.ac.uk/>))
- počet řádků a sloupců v obrazu (1354 x 2040)
- polohu (řádek/sloupec) shluku pixelů reprezentujících přestřelující vrchol na snímku (funkce *Cursor Location/Value* v IDL/ENVI)

Úloha je při znalosti těchto údajů řešena přímou úměrou. Čas snímání určitého pixelu byl počítán na sekundy. Vyšší přesnost doby snímání nemá smysl a to kvůli odchylkám při výpočtu u družice MSG.

V případě geostacionární družice MSG je určení času snímání trochu problematičtější. Družice není totiž na své dráze vzhledem k nerovnoměrnostem zemské hmoty zcela stabilní a rotační osa se mírně kýve. Snímaná oblast se tedy v rozsahu několika řádků pohybuje ve směru sever-jih. Navíc je celý obraz posléze geometricky transformován do standardní projekce, proto je každý řádek tvořen částmi několika řádků snímku původního.

Výřez Evropy pořízený v režimu rapid-scan, který použité snímky zobrazují, by měl být (dle e-mailu Zdeňka Charváta z družicového oddělení ČHMÚ) skenován v čase 02:08 až 04:08 s fluktuacemi asi 3 sekundy. Snímání probíhá od jihu a při každé otočce jsou naráz zachyceny tři řádky. Po odečtení polohy příslušného přestřelujícího vrcholu byl čas jeho skenování vypočítán přímou úměrou.

5.5 Shrnutí postupu práce

Postup práce v jednotlivých krocích je možné shrnout takto:

- 1) výběr snímků pořízených družicí MSG a operativními meteorologickými družicemi na polární dráze zachycujících konvektivní bouře,
- 2) kalibrace dat z polární družice na jasovou teplotu (načtení do vhodného software, případně použití funkce *Load Temperature* v IDL/ENVI), odečtení nebo výpočet rozmezí časů snímání pro oblast, kde se vyskytují konvektivní bouře,
- 3) výběr odpovídajícího / odpovídajících snímků pořízených geostacionární družicí MSG včetně jejich kalibrace,
- 4) detekce přestřelujících vrcholů na základě jasové teploty či ostatních, výše popsaných metod,
- 5) zpracování charakteristik jednotlivých přestřelujících vrcholů na snímcích z pohledu polární a geostacionární družice – minimální detekovaná jasová teplota, poloha přestřelujícího vrcholu, čas snímání, aj.,
- 6) statistická analýza vytvořené databáze.

6. VÝSLEDKY

6.1 Vliv geometrické rozlišovací schopnosti družice na minimální detekovanou jasovou teplotu

V rámci práce bylo analyzováno 16 konvektivních situací (tab. 5.1) s různým počtem přeletů polárních družic. Závislost detekce přestřelujících vrcholů na geometrické rozlišovací schopnosti radiometrů byla určována na základě celkového počtu asi 220 případů přestřelujících vrcholů. V potaz byly brány takové vrcholy, které byly významné svou nízkou jasovou teplotou (na snímcích pořízených radiometry nesenými polárními družicemi dosahují hodnot okolo 206 K a nižších), výrazně se projevovaly na tepelných snímcích vůči okolní HHO bouře či šlo o případy bouří s nápadnými studenými prstenci či studeným U/V.

Je nutné si uvědomit, že teplotní minima přestřelujících vrcholů souvisí také s výškou tropopausy. Ta obecně roste směrem od pólů (~ 7 až 9 km) k rovníku (~ 16 až 18 km), proto je pravděpodobnější, že nižší minimální detekované jasové teploty se vyskytnou ve Středomoří než v severní Evropě, resp. v subtropické vzduchové hmotě než v polární (pro oblast střední Evropy). Dalším kritériem pro výběr přestřelujících vrcholů byla jejich poloha na snímcích z polárních družic. Byly upřednostňovány takové, které se nevyskytují na okrajích snímaného pásu, kde je již docela nízké prostorové rozlišení vzhledem k rozlišovací schopnosti přístrojů v nadiru.

Pro každý identifikovaný přestřelující vrchol byly zpracovány údaje o minimální detekované jasové teplotě na snímcích z polární a geostacionární družice, odečtena jejich přibližná geografická poloha (dle dat z družice MSG) a geometrické rozlišení. Byl sledován čas snímání pro oba typy družic a zjištěny příslušné hodnoty jasové teploty v předešlém a následujícím snímku z družice MSG, což je vhodné pro zkoumání vývoje vrcholů, viz. tabulka 6.1 a příloha 3. Přibližnou představu o poloze jednotlivých přestřelujících vrcholů v rámci snímků MSG dávají vytvořené obrázky (obr. 6.1, příloha 4). Dále byly spočteny rozdíly příslušných minimálních jasových teplot a časů snímání jednotlivých přestřelujících vrcholů. V rámci takto připravené databáze byly provedeny nejrůznější statistiky. Teploty byly zaznamenávány s přesností na desetinu Kelvina (odchylka $\pm 0,05$ K), čas snímání s přesností na sekundy. U tohoto údaje je

předpokládána odchylka vzhledem k metodě určování u snímků z družice MSG a vzhledem k použité přesnosti záznamu do ± 5 s.

Tab. 6.1 Charakteristiky přestřelujících vrcholů konvektivních bouří ze dne 19. 5. 2008

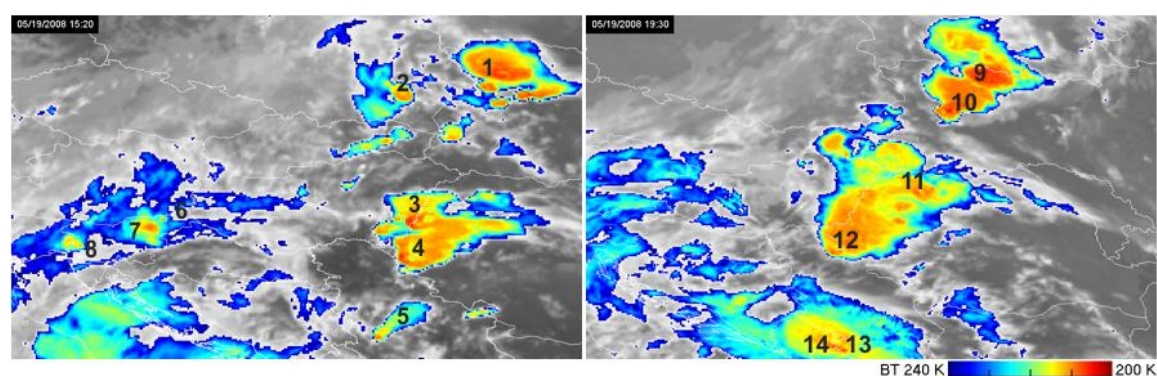
Doba/ přelet	OT ¹	Zeměpisné souřadnice		Data - MSG				Data - polární družice			Rozdíl ³		BT [K] na snímku MSG	
		z.š. [°]	z.d. [°]	snímek	BT [K]	snímání	rozlišení [km]	BT [K]	snímání	rozlišení ² [km]	BT [K]	čas [s]	-5 min	+5 min
cca 15:20 NOAA-15	1	50,8	24,9	15:25	206,4	28min24s	3,4 x 6,3	205,6	26min16s	1,7 x 1,1	0,8	128	206,4	206,4
	2	50,0	22,2	15:25	208,6	28min21s	3,3 x 6,1	205,2	26min05s	1,3 x 1,1	3,4	136	209,4	209,8
	3	46,7	21,4	15:20	205,5	23min08s	3,3 x 5,5	199,4	25min10s	1,1 x 1,1	6,1	-122	206,8	206,4
	4	45,7	21,0	15:20	206,4	23min05s	3,3 x 5,3	203,5	24min55s	1,0 x 1,1	2,9	-110	206,8	207,7
	5	43,7	20,0	15:20	209,4	22min56s	3,2 x 5,0	203,9	24min25s	1,0 x 1,1	5,5	-89	207,7	208,1
	6	46,6	15,8	15:20	210,6	23min09s	3,2 x 5,4	202,6	25min22s	0,8 x 1,1	8	-133	219,2	208,1
	7	46,4	15,5	15:20	209,4	23min08s	3,2 x 5,4	206,8	25min19s	0,8 x 1,1	2,6	-131	209,4	209,8
	8	45,9	13,9	15:20	212,2	23min06s	3,2 x 5,3	206,8	25min14s	0,8 x 1,1	5,4	-128	213,4	212,2
cca 19:30 NOAA-17	9	51,5	27,0	19:30	205,9	33min26s	3,5 x 6,6	204,7	34min26s	0,8 x 1,1	1,2	-60	205,9	206,4
	10	50,0	25,4	19:30	205,0	33min21s	3,4 x 6,2	202,1	34min10s	0,8 x 1,1	2,9	-49	205,9	206,4
	11	47,3	23,5	19:30	208,5	33min11s	3,3 x 5,6	202,1	33min29s	0,8 x 1,1	6,4	-18	208,1	207,7
	12	45,3	20,6	19:30	206,4	33min03s	3,3 x 5,3	201,7	33min06s	1,1 x 1,1	4,7	-3	207,7	207,7
	13	42,4	20,3	19:30	207,7	32min50s	3,2 x 4,9	204,3	32min22s	1,3 x 1,1	3,4	28	207,3	208,5
	14	42,5	20,1	19:30	208,1	32min51s	3,2 x 4,9	205,4	32min25s	1,3 x 1,1	2,7	26	207,3	209,8

¹ Značí číslo přestřelujícího vrcholu uvedené pro snadnější orientaci ve vytvořených obrázcích (obr. 6.1, příloha 4).

² Rozlišení u dat z družic NOAA bylo odečteno v programu 2met![®] Vision+. Dle uvedených údajů je zřejmé, že software zobrazuje nesprávné hodnoty - asi v důsledku jednoduché geometrické korekce. Údaje jsou uváděny pouze pro informaci.

³ Rozdíl v jasové teplotě a času snímání je brán vzhledem k datům z polární družice.

(zdroj dat: archiv ČHMÚ)



Obr. 6.1 Přibližná poloha detekovaných přestřelujících vrcholů ze dne 19. 5. 2008

(Snímky z MSG, čas a charakteristiky OTs viz. tab. 6.1; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

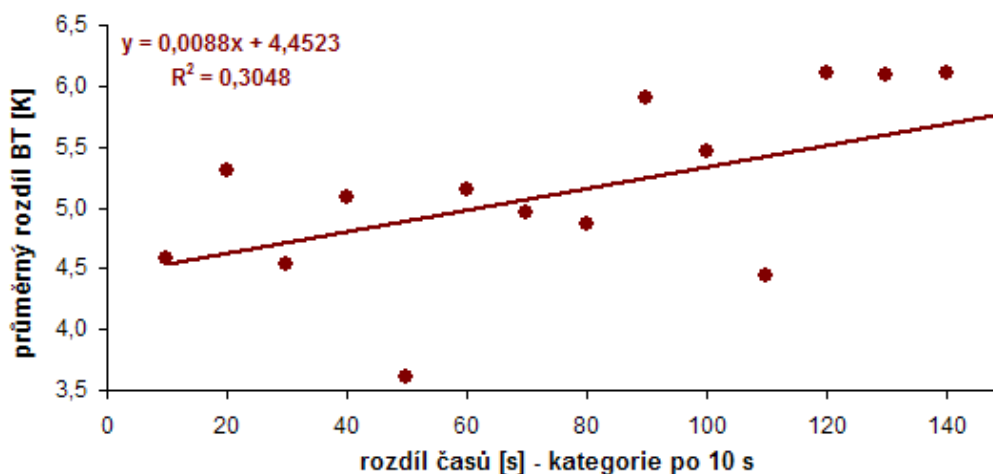
Na snímcích z polárních družic se nejnížší pozorovaná teplotní minima přestřelujících vrcholů pohybovala okolo 190 K. Teplot 200 K a nižších bylo dosaženo v 43 případech. Oproti tomu na příslušných snímcích pořízených v tepelném spektru

radiometrem SEVIRI byla jasová teplota nižší než 200 K zaznamenána pouze v jednom případě a to hodnota 198,7 K.

Průměrná hodnota rozdílu detekovaných jasových teplot v rámci všech určených přestřelujících vrcholů je 5,15 K, směrodatná odchylka 2,49 K, maximální pozorovaný rozdíl činil 13,1 K. Čas snímání se ale pro jednotlivé případy může lišit až o ± 150 s, což je již podstatná doba v rámci vývoje série přestřelujících vrcholů, kdy je odhadována jejich frekvence v rozmezí 5 až 15 minut (Setvák et al., 2008b). Dle Řezáčová et al. (2007) výstupné proudy v oblačnosti konvektivních bouří (druh cumulonimbus) dosahují středních hodnot $10 - 20 \text{ m.s}^{-1}$, což může řádově udávat představu i o rychlosti vývoje přestřelujících vrcholů. Ty však po průniku rovnovážnou hladinou postupně ztrácejí kinetickou energii, tudíž se i rychlost jejich výstupu snižuje.

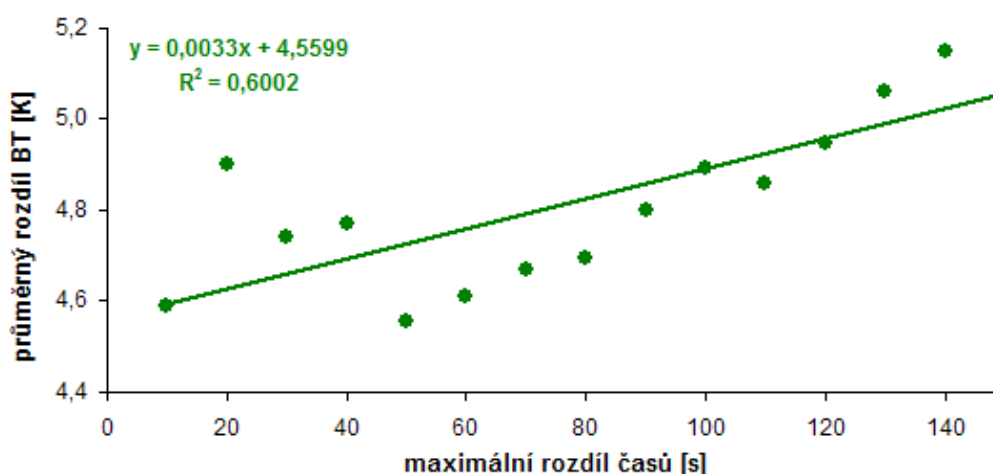
Pro jednotlivé případy nebyla zjištěna závislost rozdílu minimálních detekovaných jasových teplot na čase snímání (koeficient determinace pouze 0,03). Sledované přestřelující vrcholy se mohou mezi sebou lišit svou velikostí, vertikální mohutností, rychlostí a fází vývoje, což vše ovlivňuje jejich vzhled a pozorovaná teplotní minima na družicových snímcích. Pokud se však zaměříme na statistické charakteristiky zkoumaného souboru dat, lze již určitou závislost na čase snímání nalézt. Například liší-li se čas snímání vrcholů o maximálně 1 minutu, průměrný rozdíl jasových teplot činí pouze 4,61 K a rozptyl hodnot rozdílu teplotních minim je také nižší (směrodatná odchylka 2,39). Na základě rozdílů časů snímání byly vytvořeny kategorie po 10 sekundách a zkoumána závislost průměrné hodnoty difference minimálních teplot příslušných přestřelujících vrcholů. Graf na obrázku 6.2 znázorňuje průměrné hodnoty rozdílu teplot pro tyto kategorie, tj. časové úseky 0-10 sekund, 11-20 sekund atd. Naopak na obrázku 6.3 jsou zobrazeny průměrné rozdíly této veličiny pro vrcholy, jejichž čas snímání se lišil maximálně o danou dobu, tj. 0-10 sekund, 0-20 sekund apod.

Z uvedených grafů vyplývá, že určitá závislost na rozdílu času snímání existuje. Lze tedy říci, že s velkou pravděpodobností se budou minimální pozorované jasové teploty většího počtu přestřelujících vrcholů na příslušných družicových snímcích různého prostorového rozlišení lišit více, pokud budou skenovány v různou dobu. Tato pravděpodobnost se zvyšuje s nárůstem rozdílu časů snímání. Pro jednotlivé pozorované vrcholy však toto platit nemusí, záleží spíše na charakteristikách tohoto jevu a okolní horní hranice oblačnosti.



Obr. 6.2 Závislost průměrné hodnoty difference minimálních detekovaných jasových teplot na rozdílu časů snímání (kategorie po 10 s)

(zdroj dat: archiv ČHMÚ)



Obr. 6.3 Závislost průměrné difference pozorovaných teplotních minim na rozdílu časů snímání (odlišnost časů maximálně o danou hodnotu)

(zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Vyšší rozdíly v teplotních minimech přestřelujících vrcholů byly často pozorovány u bouří v raném stadiu vývoje. To souvisí se zpravidla menší velikostí tohoto jevu a také teplotní charakteristikou okolní HHO, u snímků s nižším rozlišením tak dochází k průměrování jasové teploty vrcholu s teplotou níže ležící a tedy teplejší oblačnosti. V případě multicelárních systémů, kdy je detekován na teplotních snímcích s vyšším rozlišením větší počet přestřelujících vrcholů relativně blízko u sebe, se mohou tyto na snímcích z družice MSG jevit jako jeden vrchol (viz. některé z pozorované

případy z přílohy 4). Případně může být v obrazu patrná větší oblast s relativně nízkými teplotami, ve které ale uživatel není schopen detekovat přestřelující vrchol.

Různě se mohou v poli jasové teploty projevovat přestřelující vrcholy u bouří vykazujících studené U/V a studené prstence. Byly zaznamenány případy, kdy nejsou v rámci bouře přestřelující vrcholy vůbec patrné, ať už jde o snímky z polárních družic či MSG (hlavně u bouří se studenými prstenci). To může souviset s fází jejich vývoje, případně mohou být součástí studeného prstence a nemusí se na snímcích výrazně projevit. Na předchozím či následujícím snímku (MSG, ± 5 minut) mohou být ale dobře identifikovatelné (např. bouře se studeným prstencem nad Bulharskem z 28. 5. 2008, Beneluxem z 25. 5. 2009). Poloha přestřelujícího vrcholu se často u těchto bouří posune v pozdější fázi jejich vývoje do centrální teplé oblasti (*central warm spot*, CWS), což může být očividné na základě dat pořízených polárními družicemi. Jasová teplota, kterou se projeví na snímcích nižšího rozlišení z MSG, závisí na jeho horizontálních rozměrech a dosažené minimální teplotě v době snímání. Pokud jeho rozměry nejsou nijak velké, kvůli průměrování s teplotami teplé centrální oblasti nemusí být na snímku vůbec identifikovatelný.

V případě bouří se studenými U/V byly přestřelující vrcholy zpravidla dobře detekovatelné pro oba druhy dat. Rozdíly v teplotních minimech mohou být různě velké. Přestřelující vrcholy u těchto bouří sousedí s výrazně teplejší oblastí CWA (*close-in warm area*), záleží tedy na tom, jakou část obrazového elementu zabírá ten který jev a jak tedy ovlivní výslednou hodnotu jasové teploty.

Vzhledem k vývoji přestřelujících vrcholů v čase byla ještě vyzkoušena možnost porovnání jasové teploty těchto vrcholů na snímcích z polárních družic s vypočtenými teoretickými hodnotami založenými na příslušných teplotách ve dvou následujících obrazech pořízených přístrojem SEVIRI. Bylo počítáno s lineární závislostí vývoje vrcholu (jasové teploty) na čase. Toto zjednodušení samozřejmě zcela neodpovídá skutečnosti, navíc může nastat případ, že na jednom snímku je zachycen přestřelující vrchol při svém vzestupu a na druhém v sestupné fázi nebo naopak a dosažené teplotní minima/maxima nemohou být družicí zachycena. Rozdíly jasových teplot se v tomto případě pohybují od -0,7 do 12,7 K, průměrná hodnota rozdílu činí 5,18 K, směrodatná odchylka 2,56 K. Což jsou podobná čísla jako v případě výpočtu s reálnými hodnotami.

6.2 Otázka časové variability minimálních teplot

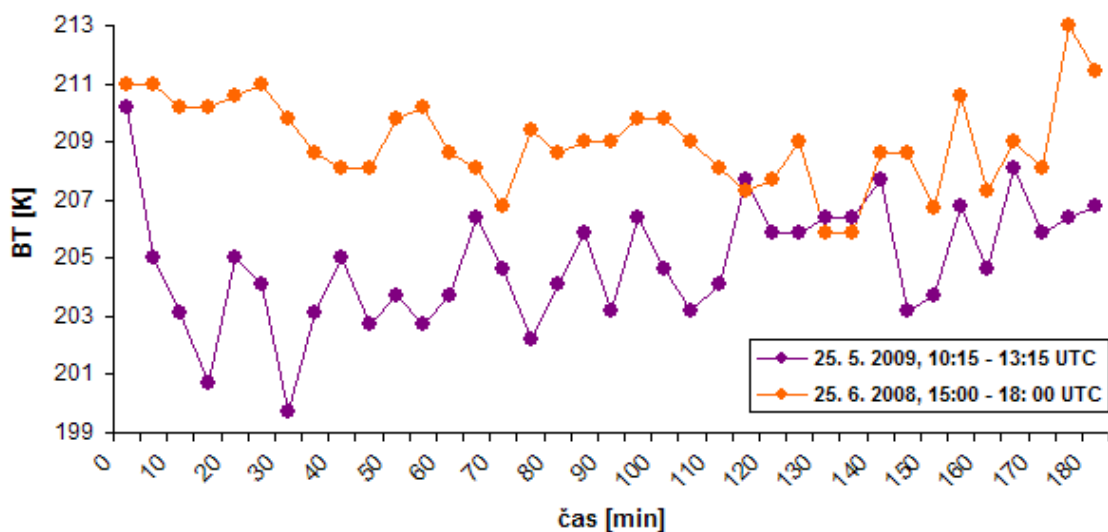
Vývoj přestřelujících vrcholů a časovou variabilitu jejich minimálních teplot by bylo vhodné zkoumat na datech s vysokou frekvencí snímání, kterou umožňují např. americké družice GOES. Snímky 5-minutového MSG RSS poskytují rovněž určitou představu o životním cyklu jednotlivých vrcholů. Vzhledem k frekvenci jejich vývoje může nastat situace, že po sobě následující snímky zachycují případ, kdy jeden vrchol zkolabuje a další ještě nezačne pronikat vzhůru, v opačném extrému mohou být zachycena minima spojená s maximální výškou dvou po sobě následujících vrcholů.

Pro přestřelující vrcholy identifikované v rámci srovnání jejich minimálních teplot na snímcích z polárních družic a MSG byly zaznamenány příslušné jasové teploty na snímcích předchozích a následujících (MSG). Rozdíly pro tento pětiminutový interval činí od - 8,8 K do 4,4 K, průměr pro zpracováváný soubor dat je 1,3 K. K výrazným změnám dochází nejčastěji u vývojově mladých cel s velkým potenciálem k dalšímu růstu. Krajní hodnoty rozdílů představují vzhledem k hodnotám přibližně nasyceně adiabatického gradientu změnu výšky přestřelujících vrcholů až o 1 km během 5 minut. Je nutné dále vzít v úvahu, že tyto hodnoty byly zaznamenány na snímcích z družice MSG s horším geometrickým rozlišením. Je pravděpodobné, že časová variabilita teplotních minim na základě dat s lepším prostorovým rozlišením by měla být ještě vyšší.

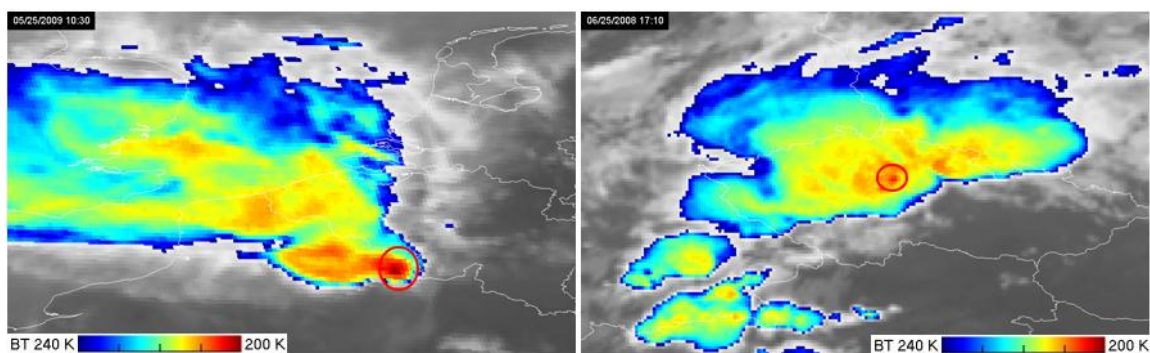
Na závěr je ještě ukázána časová proměnlivost minimálních detekovaných jasových teplot na dvou případech série přestřelujících vrcholů konvektivních bouří (obr. 6.4), a to v časovém úseku 3 hodin. Jedná se o tornadickou bouři, která se vyskytla nad střední Evropou dne 25. 6. 2008 a způsobila značné škody (<http://www.chmi.cz/torn/>), druhý případ je z 25. 5. 2009 a oblasti Beneluxu. Přibližná geografická lokace těchto jevů je znázorněna v obrázku 6.5.

Z grafu je patrná vysoká proměnlivost teplotních minim v počátečním stadiu vývoje u bouře vyskytnuvší se nad Beneluxem. Variabilita teplot zůstává zachována i v pozdější fázi, kdy se bouře vyznačuje studeným prstencem a přestřelující vrcholy jsou na jednotlivých snímcích řady dat z MSG více, či méně patrné. Série přestřelujících vrcholů v druhém případě byla sledována v již rozvinutém multicelárním systému konvektivních bouří, jak je očividné z radarové informace. Časová variabilita jejich minimálních teplot není tak výrazná, vrcholy se také projevují nižšími hodnotami

jasových teplot. Ze sledu snímků je zjevné, že na některých z nich dochází ke splnutí více vrcholů dohromady a průměrování jejich jasových teplot s teplotou okolí.



Obr. 6.4 Časová proměnlivost minimálních jasových teplot OTs vybraných bouří
(zdroj dat: archiv ČHMÚ)



Obr. 6.5 Geografická poloha OTs, u nichž byla sledována variabilita teplotních minim
(Vlevo: MSG-1, bouře ze dne 25.6.2008, 10:30 UTC (IR10.8 ENH), střední Evropa. Vpravo: MSG-1, bouře ze dne 25. 5. 2009, 10:30 UTC (IR10.8 ENH), Benelux; zdroj dat: archiv ČHMÚ)

7. DISKUZE

Závislost detekce přestřelujících vrcholů konvektivních bouří na rozlišovací schopnosti družice a času snímání byla hodnocena pomocí minimální zaznamenané jasové teploty v tepelných spektrálních kanálech, které jsou k tomuto účelu používány nejčastěji. Na základě dosažených výsledků je zjevné, že na snímcích z družice MSG se přestřelující vrcholy ve většině případů projevují vyššími hodnotami minimálních detekovaných jasových teplot než na snímcích z družic polárních. To je dáno průměrováním teploty skutečných vrcholů s teplotou níže ležící (a tedy teplejší) oblačnosti kvůli horšímu geometrickému rozlišení radiometru SEVIRI ve srovnání s přístroji nesenými družicemi na polárních drahách.

Detekované minimální jasové teploty i vypočtené hodnoty rozdílů včetně statistických údajů mohou být zatíženy řadou nejistot. Ty souvisejí nejen s přesností snímaných dat, kalibrací a stářím jednotlivých přístrojů a zpracováním snímků v různých programech, ale jsou rovněž závislé především na výběru přestřelujících vrcholů, na základě kterých byly počítány. Charakteristiky těchto jevů včetně toho, jak se projevují na satelitních snímcích se mohou pro jednotlivé případy výrazně lišit. Důležitým faktorem pro zaznamenané minimální jasové teploty jsou i vlastnosti okolí přestřelujících vrcholů.

Radiometrická přesnost jednotlivých přístrojů pro aplikované tepelné kanály bývá uváděna do 0,25 K (Goodrum et al., 2009; EUMETSAT, 2007). V rámci použitých programů a formátů dat se rovněž vyskytly nepřesnosti v detekovaných jasových teplotách. Jednalo se o data pořízená přístrojem AVHRR, kdy přestřelující vrcholy na snímcích formátu *Level 1B*, které byly zpracovávány v programu *HRPT Reader*, vykazovaly vyšší hodnoty, než na snímcích formátu *XPIF* otevřených a kalibrovaných v programu *IDL/ENVI* (resp. jeho „zásuvném modulu“ vyvinutém před několika lety, který tuto kalibraci zajišťuje). Pro některé datasety (NOAA-15) se jednalo o rozdíly několika Kelvinů, u ostatních byly zaznamenány odchylky v řádu desetin Kelvina. Kvůli příliš nízkým, nereálným hodnotám minimálních jasových teplot pro data formátu *XPIF* kalibrovaná zásuvným modulem programu *IDL/ENVI* v porovnání s teplotami na snímcích z MSG (rozdíly až 18 K) byl pro zpracování práce nakonec použit formát *Level 1B* a software *HRPT Reader*.

Uvedené výsledky závisí kromě vlastností přestřelujících vrcholů také na jejich poloze v rámci satelitních snímků. Geografická poloha přestřelujícího vrcholu souvisí s geometrickým rozlišením a tedy i s mírou průměrování jasových teplot vrcholů a jejich okolí. Na použitých snímcích z MSG zobrazujících výřez Evropy mohou být přestřelující vrcholy konvektivních bouří vyskytující se např. ve Středomořské oblasti lépe detekovatelné a projevovat se nižšími jasovými teplotami než ty na území střední a zvláště pak východní či severní Evropy. Poloha vrcholů na snímcích z polárních družic (a jejich prostorové rozlišení) záleží na dráze přeletu. V diplomové práci byly zpracovávány takové přestřelující vrcholy, které se vyskytovaly spíše ve střední části snímáného pásu, aby se lépe projevil rozdíl příslušných jasových teplot daný právě prostorovým rozlišením.

Vliv rozdílu časů snímání na velikost difference jasové teploty byl popsán v předchozí kapitole. Uvedené hodnoty se ale zvláště kvůli technologii skenování v případě družice MSG mohou lišit až o několik sekund. Pro přesnost vypočtených statistik rozdílů jasových teplot by bylo vhodné, aby se časy snímání jednotlivých porovnávaných družic lišily minimálně. Rozdíl času snímání maximálně do 10 s by vzhledem k rychlostem vývoje přestřelujících vrcholů znamenal odchylku do 1 K. Jak je však patrné ze zpracované databáze (příloha 3), případů, kdy jsou přestřelující vrcholy snímány oběma družicemi téměř ve stejnou dobu, nebylo nalezeno mnoho. Pro takovouto analýzu by byl nutný mnohonásobně větší objem zpracovávaných dat, přesahující rámec této práce.

Na dosažené výsledky může mít vliv také fakt, že v rámci jednotlivých konvektivních situací byl analyzován různý počet přestřelujících vrcholů. Například v případě multiceleárních systémů jsou spolu jednotlivé bouřkové buňky svázány do více či méně organizované struktury a mohou se vzájemně ovlivňovat. Může existovat tudíž i určitá závislost mezi některými vlastnostmi přestřelujících vrcholů zahrnutých do celkové databáze.

Možnost identifikace přestřelujících vrcholů a hodnoty příslušných jasových teplot však nejvíce ovlivňují jejich vertikální a horizontální rozměry společně s charakterem okolní HHO bouře. Dle literatury (Brunner et al., 2007) činní největší zjištěné horizontální rozměry, kterých přestřelující vrcholy dosáhly, cca 12 km (na základě snímků z přístroje MODIS a AVHRR). V rámci této práce byly pro plošně

nejrozsáhlejší přestřelující vrcholy detekovány na snímcích z polárních družic hodnoty podobné (např. 28. 5. 2008, 15 hodin, OT1 či 29. 5. 2008, 20:45, OT9).

Vliv vysokých prostorových teplotních gradientů na pozorované hodnoty jasové teploty se projevuje zvláště u vývojově mladých konvektivních bouří a také u bouří vykazujících studené U/V či výrazné studené prstence. V posledním z jmenovaných případů nemusí být přestřelující vrcholy zvláště na tepelných snímcích z MSG vůbec identifikovatelné, důvody tohoto jevu jsou v současnosti předmětem dalšího zkoumání. Možnosti detekce přestřelujících vrcholů souvisí také s jejich životním cyklem, resp. výškou které dosahují. Záleží také na tom, je-li přestřelující vrchol zachycen na snímku ve své výstupné či sestupné fázi. Při sestupu dochází zpravidla k rychlejšímu ohřevu v důsledku vtahování a promíchávání s okolním vzduchem teplejší stratosféry.

Dle předpokladu je průměrná hodnota rozdílu příslušných teplotních minim pro data z družice MSG a polárních družic nižší než ta, zjištěná Setvákem a Levizzanim (1992). Ti porovnávali data pořízená v termálních kanálech přístroji AVHRR/NOAA a VISSR/METEOSAT, který má oproti družici MSG nižší prostorovou rozlišovací schopnost a také kalibrace tohoto přístroje byla prováděna rozdílným způsobem. V jejich studii byly analyzovány pouze tři případy konvektivních bouří s přestřelujícími vrcholy a rozdíly časů snímání činí několik minut. Pro srovnání s dosaženými výsledky této práce se proto uvedená data nehodí.

Hodnoty rozdílu 10 K a vyšší, které identifikoval pro konvektivní bouře vyskytující se nad Spojenými státy americkými Negri (1982), se v rámci zpracované databáze vyskytly v deseti případech. Diference cca 20 K nebyla pozorována, je ale pravda, že uvedený autor srovnával data z družic NOAA POES s daty z tehdejších družic GOES, které měly oproti současnému MSG nižší prostorové rozlišení.

V této práci nebyla provedena žádná validace výsledků na základě jiných typů dat, což by bylo příhodné. Hlavní příčinou je absence dostupnosti vhodných typů dat. Jak již bylo zmíněno dříve, operativní radarová měření evropských meteorologických služeb dosahují výšky pouze 14 km (či nižší), což je pro řadu konvektivních bouří, resp. přestřelujících vrcholů nedostačující hladina. Je sice možné zpětně zpracovat archivní radarová data až do hladiny 20 km, to se však vymyká možnostem této práce. Data radiolokační odrazivosti jsou navíc zatížena řadou chyb a je nutné brát v úvahu fyzikální podstatu tohoto měření, kdy nejsou detekovány nejmenší částice. Možné je například stanovit polohu přestřelujících vrcholů v rámci bouře, jelikož se tento jev

vyskytuje nad oblastí maximálních radarových odrazivostí spojených s updrafty. V tomto případě by však bylo nutné dopočítat hodnotu paralaxy a provést příslušnou korekci. Výška jednotlivých částí HHO bouří, která je pro výpočet paralaxy nutná, však není dostatečně přesně známa.

Numerické předpovědní modely a aerologické sondáže mohou podat informaci o aktuální výšce a teplotě tropopausy. Na základě těchto údajů a v kombinaci s informací o jasové teplotě je možné určit, zda příslušný vrchol pronikl touto hladinou a odhadnout přibližnou hodnotu jeho výšky nad zemským povrchem, případně tropopausou.

Ideálním nástrojem pro přesnější stanovení výšky HHO bouře a přestřelujících vrcholů by byl vertikálně snímající radar (CPR) nesený družicí CloudSat. Ten je schopen oproti pozemním meteorologickým radarům zachytit i drobné částice. Časové rozlišení tohoto přístroje je však nízké, pořízená data představují pouhé momentky. Pravděpodobnost že bude zachycen profil vedený centrální partií konvektivní bouře včetně přestřelujícího vrcholu, je tedy poměrně malá, doposud bylo zaznamenáno pouze malé množství podobných případů z různých částí světa (Bedka et al, 2010), avšak doposud žádný z prostoru střední Evropy (Setvák, osobní komunikace 2009).

8. ZÁVĚR

Přestřelující vrcholy konvektivních bouří, zejména jejich jasová teplota, bývají používány jako indikátory potenciální nebezpečnosti určitého vývojového stádia bouří. Cílem práce bylo zjistit vliv geometrické rozlišovací schopnosti operativních meteorologických družic na možnosti detekce tohoto jevu na satelitních snímcích, kde se přestřelující vrcholy zpravidla projevují teplotními minimy. Dosažené výsledky lze shrnout do několika základních poznatků:

Na tepelných snímcích pořízených radiometry nesenými polárními družicemi jsou přestřelující vrcholy povětšinou dobře identifikovatelné, pokud nenastane případ, kdy se již kolabující vrchol nachází ve fázi blízko úrovně rovnovážné hladiny. Pro některé případy bouří, projevujících se na snímcích pořízených v tepelném pásmu výraznými studenými prstenci, nemusí být přestřelující vrcholy teplotně rovněž detekovatelné.

Také na tepelných snímcích z družice MSG je možné často pozorovat více či méně výrazné chladné pixely / shluky pixelů představující přestřelující vrcholy. V tomto případě však schopnost jejich detekce mnohem více záleží na jejich charakteristikách a dalších faktorech. Je také třeba zmínit, že obrazový element může být v mnoha případech klasifikován jako přestřelující vrchol až po zahrnutí dalších informací (data z polárních družic, snímky ve viditelném spektru a jejich barevné kombinace, vývoj teplot v sérii po sobě následujících tepelných snímků).

Geometrické rozlišení přístroje má výrazný vliv na hodnotu detekovaných teplotních minim. Při průměrování jasové teploty skutečného přestřelujícího vrcholu s teplotou okolní HHO bouře se v určitém snímku může vrchol jevit teplejším, než je ve skutečnosti, tím pádem dochází k podcenění intenzity bouře. Na snímcích z polárních družic byly zachyceny výraznější teplotní minima. Průměrný rozdíl teplot na příslušných snímcích z MSG a polárních družic dosáhl v rámci zpracovaného souboru asi 220 přestřelujících vrcholů hodnoty 5,15 K. Maximální pozorovaný rozdíl byl 13,1 K, v deseti případech dosáhl hodnot 10 K a vyšších. Velikost tohoto rozdílu se odvíjí také od rozdílu časů snímání přestřelujících vrcholů. Jednotlivé konvektivní bouře a jejich přestřelující vrcholy se chovají, co se týče jejich vývoje, velice individuálně. Lze však s vysokou pravděpodobností předpokládat nárůst pozorovaného

rozdílu při zvyšující se diferenci časů snímání a to až do určité mezní hodnoty, která souvisí s dobou životního cyklu přestřelujícího vrcholu.

Rozdíl pozorovaných teplot přestřelujících vrcholů se neodvíjí pouze od prostorového rozlišení obrazových elementů a rozdílu časů snímání. Dalšími důležitými faktory je dosažená výška vrcholu v čase snímání, jeho horizontální velikost, teplota okolní HHO či vzdálenost mezi jednotlivými přestřelujícími vrcholy. Mimo těchto vlastností záleží výrazně na fázi vývoje, ve které byl přestřelující vrchol na družicových snímcích zachycen. Tento jev je velice časově proměnlivý a zaznamenání maximální fáze vývoje a tedy i minimální jasové teploty je dosti nahodilou záležitostí. Nejvýraznější rozdíly teplot se projevují u raného stadia vývoje konvektivních bouří a dále u bouří se studenými prstenci.

Časová variabilita minimálních detekovaných jasových teplot byla zkoumána na datech z MSG pořízených v pětiminutovém intervalu. V rámci zpracované databáze byly pozorovány rozdíly teplotních minim přestřelujících vrcholů mezi následujícími snímky od - 8,8 K do 4,4 K, vyšší proměnlivost přísluší vývojově mladým bouřím. Pětiminutový interval snímání však není pro zkoumání životního cyklu přestřelujících vrcholů postačující.

Zpracovávané téma bylo doposud mimo okruh zájmu družicové meteorologie a v rámci jednotlivých studií byl problém zkreslení minimální detekované jasové teploty u družic s nižší prostorovou rozlišovací schopností pouze nastíněn či ukázán na malém počtu případů. Uvedené výsledky mohou posloužit k posouzení reprezentativnosti údajů o minimální detekované teplotě HHO bouří a jejich použitelnosti v rámci krátkodobých předpovědí. Bylo by však vhodné, aby bylo téma zpracováno více do hloubky a posouzena míra vlivu všech možných faktorů. To však nelze realizovat bez detailní analýzy celkového vývoje jednotlivých konvektivních situací a zahrnutí i dalších typů dat (pozemní radarová měření, údaje z radarů či lidarů na oběžné dráze, případně experimentální letecké snímkování HHO bouří, aj.).

SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ

Seznam použitých pramenů a literatury

- ACKERMAN, S.A. (1996): Global satellite observations of negative brightness temperature differences between 11 and 6.7 microns. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53, s. 2803-2812. ISSN 1520-0469.
- ADLER R.F., MARKUS, M.J., FENN, D.D. (1985): Detection of severe Midwest thunderstorms using geosynchronous satellite data. *Monthly Weather Review*, 113, s. 769-781. ISSN 1520-0493.
- AMATEUR STORMCHASING SOCIETY: *Meteorologické stránky skupiny pozorovatelů konvektivních bouří* [on-line], poslední aktualizace 2009, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.bourky.com/index.php>>.
- BEDKA, K., BRUNNER, J., DWORAK, R., FELTZ, W., OTKIN, J., GREENWALD, T. [2010]: Objective Satellite-Based Overshooting Top Detection Using Infrared Window Channel Brightness Temperature Gradients. (přijato k tisku v *Journal of Applied Meteorology and Climatology*).
- BERENDES, T.A., MECIKALSKI, J.R., MACKENZIE Jr., W.M., BEDKA, K.M., NAIR, U.S. (2008): Convective cloud identification and classification in daytime satellite imagery using standard deviation limited adaptive clustering. *Journal of Geophysical Research*, 113. ISSN 0148-0227.
- BRUNNER, J.C., FELTZ, W.F., ACKERMAN, S.A. (2007): Toward an Objective Enhanced-V Detection Algorithm. *The 2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Amsterdam, The Netherlands. ISBN 92-9110-079-X.
- COLORADO STATE UNIVERSITY: *CloudSat* [on-line], poslední aktualizace 4. 8. 2009, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>>.
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: *Informace o družicích NOAA* [online], poslední aktualizace 28.7.2006, [cit. 2008-03-12], Dostupné z: <http://www.chmi.cz/-meteo/sat/inf_noaa.html>.
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: *Tornáda a jevy příbuzné na území České republiky* [on-line], poslední aktualizace 20. 7. 2009, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.chmi.cz/torn/>>.

- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: *Zpracování bleskových dat* [on-line], poslední aktualizace 8. 7. 2006, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.chmi.cz/meteo/rad/blesk/>>.
- DUNDEE SATELLITE RECEIVING STATION: *Quicklooks of satellite images* [on-line], průběžně aktualizováno, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.sat.dundee.ac.uk/>>.
- EUMETSAT: *Satellites* [on-line], poslední aktualizace 25. 6. 2008, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites>.
- EUMETSAT (2006): *MSG Interpretation Guide* [on-line], © 2006, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z: <http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html>.
- EUMETSAT (2007): *Radiometric Calibration of MSG SEVIRI Level 1.5 Image Data in Equivalent Spectral Blackbody Radiance* [on-line], © 2007, [cit. 2009-08-15]. EUM/OPS-MSG/TEN/03/0064. Dostupné z URL: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/Documentation/Technical_and_Scientific_Documentation>.
- EUMETSAT (2008): *Technická dokumentace SAFNWC* [on-line], poslední aktualizace 31. 1. 2008, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z: <<http://www.meteorologie.eu.org/safnwc/>>.
- FRITZ, S., LASZLO, I. (1993): Detection of water vapor in the stratosphere over very high clouds in the tropics. *Journal of Geophysical Research*, 98, s. 22959-22967. ISSN 0148-0227.
- FUJITA, T.T. (1982): Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 60, s. 355-368. ISSN 0026-1165.
- GOODRUM, G., KIDWELL, K., WINSTON, W.: *NOAA KLM User's guide* [on-line], poslední aktualizace 3. 3. 2009, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>>.
- HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (2005): *Dálkový průzkum Země*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 192 s. ISBN 80-01-03124-1.
- HASLER, A.F. (1981): Stereographic observation from geosynchronous satellites – an important new tool for the atmospheric science. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 62, s. 194-212. ISSN 1520-0477.
- HEYMSFIELD, G.M., BLACKMER Jr., R.H. (1988): Satellite-observed characteristics of Midwest severe thunderstorms anvils. *Monthly Weather Review*, 116, s. 2200-2224. ISSN 1520-0493.

- HEYMSFIELD, G.M., FULTON, R., SPINHIRNE, J.D. (1991): Aircraft overflight measurements of Midwest severe storms: Implications on geosynchronous satellite interpretations. *Monthly Weather Review*, 119, s. 436-456. ISSN 1520-0493.
- KNIHOVNA AV ČR: *SPACE 40: Velká encyklopedie družic a kosmických sond* [on-line], © 2006, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.lib.cas.cz/space.40>>.
- KYZNAROVÁ, H., NOVÁK, P. (2008): Využití radarových měření pro identifikaci a předpověď pohybu konvekčních bouří. *Meteorologické zprávy, Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 1, s. 14-19. ISSN 0026-1173.
- LEVIZZANI, V., SETVÁK, M. (1996): Multispectral, high-resolution satellite observations of plumes on top of convective storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53, s. 361-369. ISSN 1520-0469.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. (1994): *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, 750 s. ISBN 0-471-57783-9.
- McCANN, D.W. (1983): The enhanced-V: A satellite observable severe storm signature. *Monthly Weather Review*, 111, s. 887-894. ISSN 1520-0493.
- MELLANI, S., CATTANI, E., TORRICELLA, F., LEVIZZANI, V. (2003): Characterization of plumes on top of a deep convective storms using AVHRR imagery and radiative transfer model simulations. *Atmospheric Research*, 67-68, s. 485-499. ISSN 0169-8095.
- MENZEL, P.W. (2001): Applications with meteorological satellites. WMO, SAT-28 Technical Document, WMO/TD No.1078, 242 s.
- MILLS, P.B., ASTLING, E.G. (1977): Detection of tropopause penetrations by intense convection with GOES enhanced infrared imagery. *Preprints 10th Conference on Severe Local Storms*, Omaha, American Meteorological Society, s. 61-64.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA): *Current Missions* [on-line], poslední aktualizace 18. 6. 2009, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.nasa.gov/missions/current/>>.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA): *CLASS* [on-line], poslední aktualizace 2009, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome>>.
- NEGRI, A.J. (1982): Cloud-top structure of tornadic storms on 10 April 1979 from rapid scan and stereo satellite observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, s. 1151-1159. ISSN 1520-0477.

- NOVÁK, P., HAVRÁNEK, P., KRÁČMÁR, J. (2008): Česká meteorologická radarová síť CZRAD v roce 2008. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 5, s. 129-136. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., SETVÁK, M. (2008): *Aplikace distančních pozorování a detekčních metod v meteorologii*. [elektronický zdroj]. Praha : MFF UK. Výukové materiály k předmětu.
- RADOVÁ, M., SEIDL, J. (2008): Parallax applications when comparing radar and satellite data. *The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Darmstadt, Germany. EUMETSAT P. 52. ISSN 1011-3932.
- RAO, P.K. et al. (1990): *Weather Satellites: Systems, Data and Environmental Applications*. Boston : AMS, 503 s. ISBN-0-933876-66-1.
- ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M. (2007): *Fyzika oblaků a srážek*. Praha : Academia, 576 s. ISBN 978-80-200-1505-1.
- SAN FRANCISCO STATE UNIVERSITY: *Department of Geosciences: Storm Chasing* [on-line], poslední aktualizace 17. 11. 2005, [cit.2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://tornado.sfsu.edu/geosciences/StormChasing>>.
- SCHMETZ, J., TJEMKES, S.A., GUBE, M., VAN DE BERG, L. (1997): Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT. *Advances in Space Research*, 19, s. 433-441. ISSN 0273-1177.
- SETVÁK, M. (2004): MSG – Meteosat druhé generace. *Meteorologické zprávy*, roč. 57, č. 1, s. 15-20. ISSN 0026-1173.
- SETVÁK, M., LEVIZZANI, V. (1992): Influences of NOAA and Meteosat Spatial Resolution on Cloud Top Observations of Deep Convective Storms. In *Proc. 9th Meteosat Scientific Users' Meeting*, Locarno : EUMETSAT, EUM P11, s. 169-174. ISSN 1011-3932.
- SETVÁK, M., LINDSEY, D.T., NOVÁK, P., RABIN, R.M., WANG, P.K., KERKMANN, J., RADOVÁ, M., ŠTÁSTKA, J. (2008a): Cold-ring shaped storms in Central Europe. *The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Darmstadt, Germany. EUMETSAT P. 52. ISSN 1011-3932.
- SETVÁK, M., NOVÁK, P., RADOVÁ, M., (2008b): Teplotní charakteristiky horní hranice oblačnosti konvektivních bouří na družicových snímcích a jejich interpretace. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 4, s. 97-105. ISSN 0026-1173.
- SETVÁK, M., RABIN, R.M., DOSWELL, CH.A.III., LEVIZZANI, V. (2003): Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 μm spectral bands. *Atmospheric Research*, 67, s. 607-627. ISSN 0169-8095.

- SETVÁK, M., RABIN, R.M., WANG, P.K. (2007b): Contribution of the MODIS instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery. *Atmospheric Research*, 83, s. 505-518. ISSN 0169-8095.
- SOBÍŠEK, B. et al. (1993): *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. 1. vyd. Praha : Ministerstvo životního prostředí České republiky, 594 s. ISBN 80-85368-45-5.
- STORMCHASE WA: *Stormchase WA Photo Gallery* [on-line], poslední aktualizace 29. 11. 2006, [cit. 2009-08-15]. Dostupné z URL: <<http://www.stormchase-wa.com/gallery/>>.
- ŠTÁSTKA, J., SETVÁK, M. (2008): Cloud Top Temperature and Height product of the Nowcasting SAF applied to tropopause-penetrating cold-ring shaped storms. *The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Darmstadt, Germany. EUMETSAT P. 52. ISSN 1011-3932.
- VCS (2009): *Vision+ Users Guide*. [elektronický zdroj]. Bochum : VCS Aktiengesellschaft, 81 s. Manuál k programu 2met!® Vision+ v podobě souboru PDF.
- VOLNÝ, R., SULAN, J., SMOLÍKOVÁ, Z. (2008): Souhrnný přehled významných konvektivních jevů na území České republiky v letech 2002-2006. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 4, s. 106-112. ISSN 0026-1173.
- WANG, P.K. (2003): Moisture plumes above thunderstorm anvils and their contribution to cross-tropopause transport of water vapor in midlatitudes. *Journal of Geophysical Research*, 108, s. AAC5-1-5 – AAC5-1-15. ISSN 0148-0227.
- WANG, P.K. (2007): The thermodynamic structure atop a penetrating convective thunderstorm. *Atmospheric Research*, 83, s. 254-262. ISSN 0169-8095.

Zdroje dat

Archiv satelitních snímků z družic MSG, MetOp, NOAA a EOS Aqua a Terra, Družicové oddělení Českého hydrometeorologického ústavu, <http://www.chmi.cz/meteo/sat/>

Použitý software

2met!® Vision+, Ver. 1.5, © October 2008, VCS Aktiengesellschaft, <http://www.vcs.de>
 HRPT Reader, Ver. 2.8.4, © 2009, David Taylor, <http://www.satsignal.eu/software/hrpt.htm>
 IDL/ENVI, Ver. 4.4, © 2007, ITT Visual Information Solutions, <http://www.itvis.com/>
 CorelDRAW Graphics Suite X4, Ver. 14, © 2008, Corel Corporation

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Družice a přístroje, jejichž data byla zpracovávána

Příloha 2 Důležité údaje o pořízeném snímku

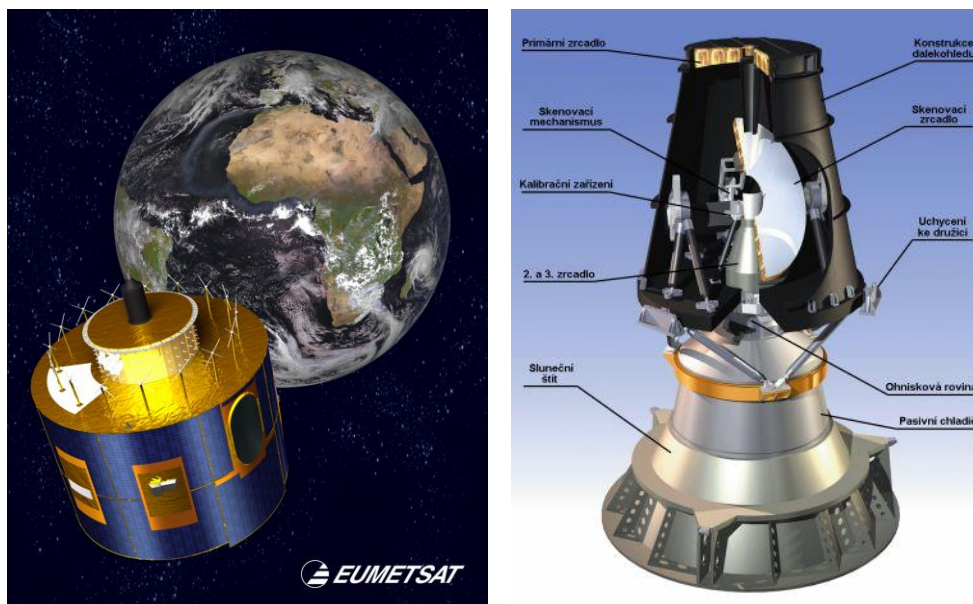
Příloha 3 Srovnávané charakteristiky jednotlivých přestřelujících vrcholů

Příloha 4 Poloha detekovaných přestřelujících vrcholů na snímcích MSG

PŘÍLOHY

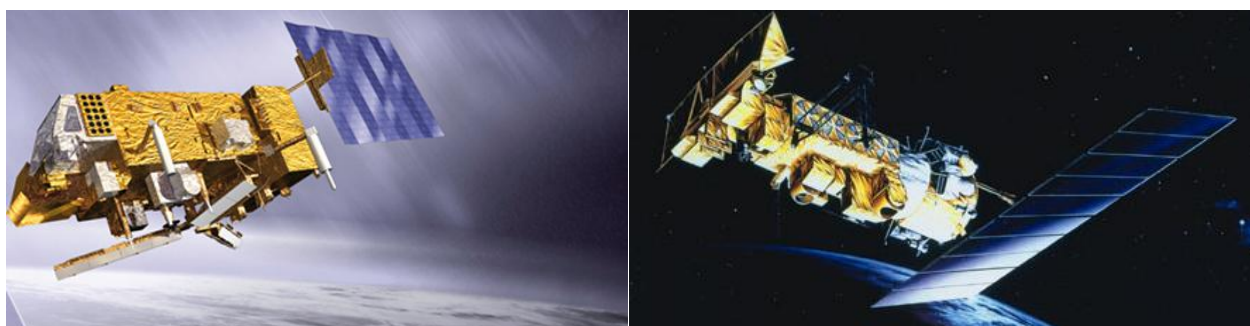
Příloha 1 Družice a přístroje, jejichž data byla zpracovávána

Příloha 1.1: Družice MSG a přístroj SEVIRI



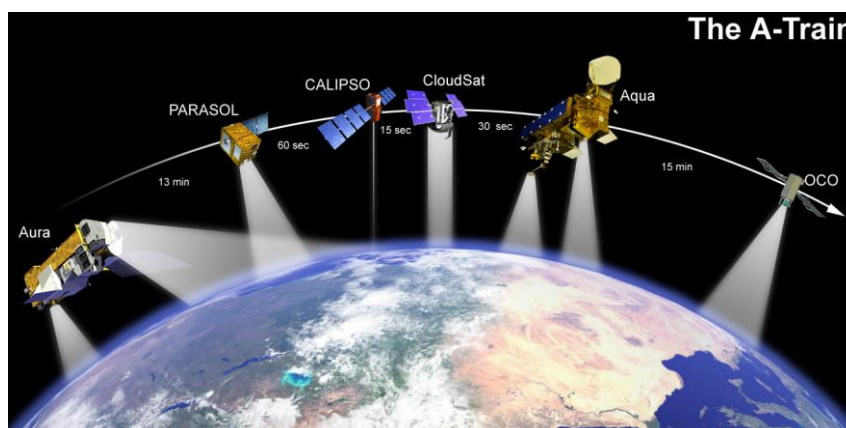
(zdroj: http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites; <http://www.chmi.cz/-meteo/sat/>)

Příloha 1.2: Družice MetOp a AVHRR



(zdroj: http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites; <http://www.chmi.cz/-meteo/sat/>)

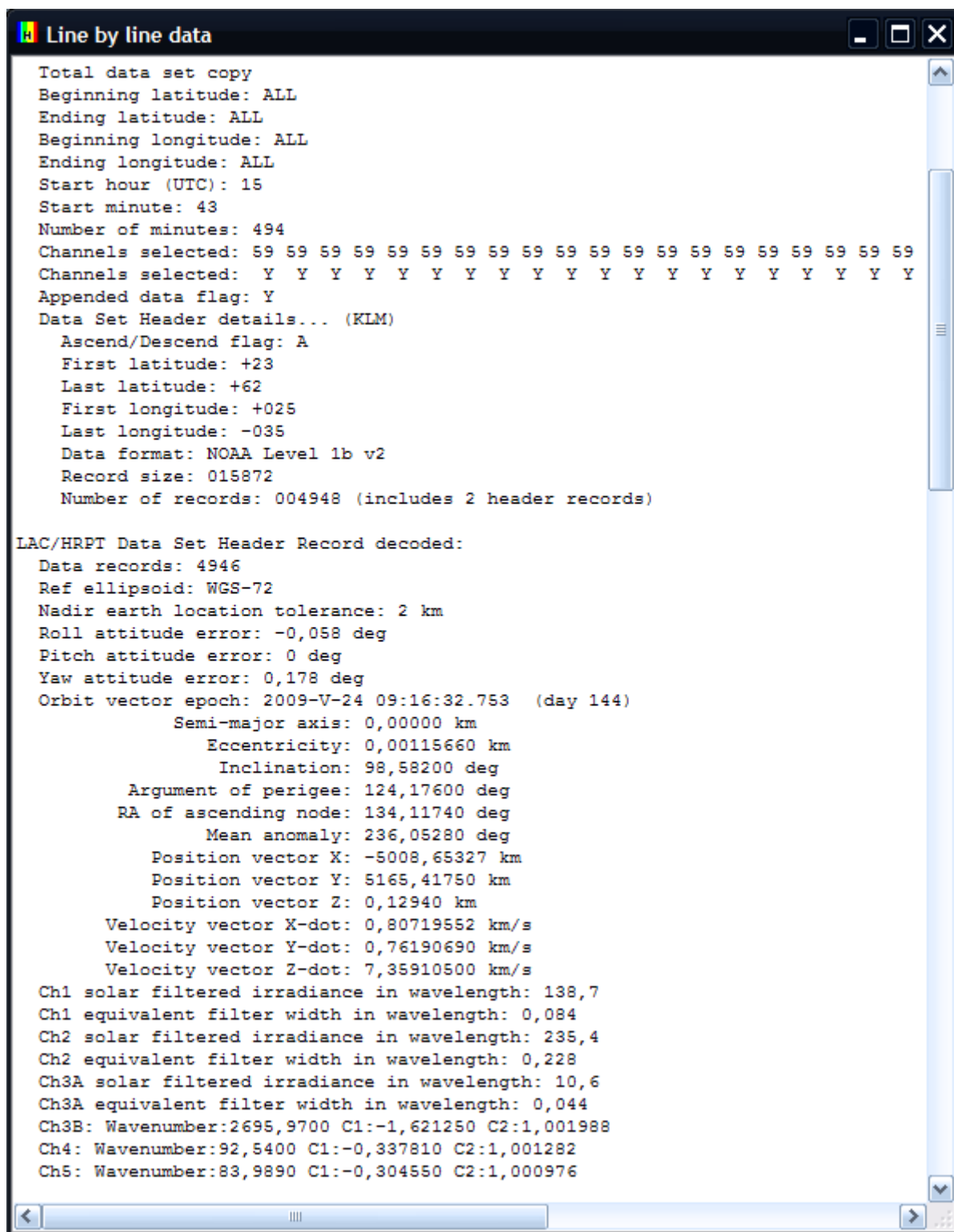
Příloha 1.3: Postavení družice Aqua v rámci konstelace A-Train



(zdroj: <http://www.nasa.gov/missions/current/>)

Příloha 2 Důležité údaje o pořízeném snímku

Příloha 2: Část textového dokumentu obsahujícího údaje o pořízeném snímku včetně informací nutných pro jeho kalibraci a georeferenci (zobrazen pomocí funkce Diagnostics v programu HRPT Reader)



```
Line by line data
Total data set copy
Beginning latitude: ALL
Ending latitude: ALL
Beginning longitude: ALL
Ending longitude: ALL
Start hour (UTC): 15
Start minute: 43
Number of minutes: 494
Channels selected: 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59
Channels selected: Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y
Appended data flag: Y
Data Set Header details... (KLM)
  Ascend/Descend flag: A
  First latitude: +23
  Last latitude: +62
  First longitude: +025
  Last longitude: -035
  Data format: NOAA Level 1b v2
  Record size: 015872
  Number of records: 004948 (includes 2 header records)

LAC/HRPT Data Set Header Record decoded:
  Data records: 4946
  Ref ellipsoid: WGS-72
  Nadir earth location tolerance: 2 km
  Roll attitude error: -0,058 deg
  Pitch attitude error: 0 deg
  Yaw attitude error: 0,178 deg
  Orbit vector epoch: 2009-V-24 09:16:32.753 (day 144)
    Semi-major axis: 0,00000 km
    Eccentricity: 0,00115660 km
    Inclination: 98,58200 deg
    Argument of perigee: 124,17600 deg
    RA of ascending node: 134,11740 deg
    Mean anomaly: 236,05280 deg
    Position vector X: -5008,65327 km
    Position vector Y: 5165,41750 km
    Position vector Z: 0,12940 km
    Velocity vector X-dot: 0,80719552 km/s
    Velocity vector Y-dot: 0,76190690 km/s
    Velocity vector Z-dot: 7,35910500 km/s
  Ch1 solar filtered irradiance in wavelength: 138,7
  Ch1 equivalent filter width in wavelength: 0,084
  Ch2 solar filtered irradiance in wavelength: 235,4
  Ch2 equivalent filter width in wavelength: 0,228
  Ch3A solar filtered irradiance in wavelength: 10,6
  Ch3A equivalent filter width in wavelength: 0,044
  Ch3B: Wavenumber:2695,9700 C1:-1,621250 C2:1,001988
  Ch4: Wavenumber:92,5400 C1:-0,337810 C2:1,001282
  Ch5: Wavenumber:83,9890 C1:-0,304550 C2:1,000976
```

(zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Příloha 3 Srovnávané charakteristiky jednotlivých přestřelujících vrcholů

Příloha 3: Údaje o jednotlivých detekovaných přestřelujících vrcholech zachycených na snímcích z družice MSG a příslušných snímcích z operativních meteorologických družic na polární dráze. Data pořízená přístrojem SEVIRI byla zpracována v prostředí 2met!® Vision+, data z MODISu v IDL/ENVI, ostatní data (AVHRR) pomocí programu HRPT Reader.

Datum/ přelet	OT ¹	Souřadnice (dle MSG)		MSG				Polární družice			Rozdíl ³		BT [K] na snímku MSG		
		z.š. [°]	z.d. [°]	snímek	BT [K]	čas snímání	rozlišení [km]	BT [K]	čas snímání	rozlišení [km] ²	BT [K]	čas [s]	-5 min	+5 min	
19.5.2008															
cca 15:20 NOAA-15	1	50,8	24,9	15:25	206,4	28min24s	3,4 x 6,3	205,6	26min16s	1,7 x 1,1	0,8	128	206,4	206,4	
	2	50,0	22,2	15:25	208,6	28min21s	3,3 x 6,1	205,2	26min05s	1,3 x 1,1	3,4	136	209,4	209,8	
	3	46,7	21,4	15:20	205,5	23min08s	3,3 x 5,5	199,4	25min10s	1,1 x 1,1	6,1	-122	206,8	206,4	
	4	45,7	21,0	15:20	206,4	23min05s	3,3 x 5,3	203,5	24min55s	1,0 x 1,1	2,9	-110	206,8	207,7	
	5	43,7	20,0	15:20	209,4	22min56s	3,2 x 5,0	203,9	24min25s	1,0 x 1,1	5,5	-89	207,7	208,1	
	6	46,6	15,8	15:20	210,6	23min09s	3,2 x 5,4	202,6	25min22s	0,8 x 1,1	8	-133	219,2	208,1	
	7	46,4	15,5	15:20	209,4	23min08s	3,2 x 5,4	206,8	25min19s	0,8 x 1,1	2,6	-131	209,4	209,8	
	8	45,9	13,9	15:20	212,2	23min06s	3,2 x 5,3	206,8	25min14s	0,8 x 1,1	5,4	-128	213,4	212,2	
cca 19:30 NOAA-17	9	51,5	27,0	19:30	205,9	33min26s	3,5 x 6,6	204,7	34min26s	0,8 x 1,1	1,2	-60	205,9	206,4	
	10	50,0	25,4	19:30	205,0	33min21s	3,4 x 6,2	202,1	34min10s	0,8 x 1,1	2,9	-49	205,9	206,4	
	11	47,3	23,5	19:30	208,5	33min11s	3,3 x 5,6	202,1	33min29s	0,8 x 1,1	6,4	-18	208,1	207,7	
	12	45,3	20,6	19:30	206,4	33min03s	3,3 x 5,3	201,7	33min06s	1,1 x 1,1	4,7	-3	207,7	207,7	
	13	42,4	20,3	19:30	207,7	32min50s	3,2 x 4,9	204,3	32min22s	1,3 x 1,1	3,4	28	207,3	208,5	
	14	42,5	20,1	19:30	208,1	32min51s	3,2 x 4,9	205,4	32min25s	1,3 x 1,1	2,7	26	207,3	209,8	
20.5.2008															
cca 11:30 NOAA-18	1	46,5	19,0	11:30	210,2	33min08s	3,2 x 5,4	204,6	32min37s	0,9 x 1,1	5,6	31	211,8	209,8	
	2	44,9	19,4	11:30	207,7	33min01s	3,2 x 5,2	206,1	32min09s	0,9 x 1,1	1,6	52	210,2	208,6	
cca 14:00 NOAA-16	3	47,2	23,0	14:05	208,1	8min10s	3,3 x 5,6	204,4	10min24s	1,1 x 1,1	3,7	-134	211,4	206,8	
	4	46,9	20,4	14:05	210,2	8min10s	3,3 x 5,5	201,6	10min31s	1,4 x 1,1	8,6	-141	209,4	211	
cca 15:00 NOAA-15	5	47,3	23,0	15:00	207,7	3min11s	3,3 x 5,6	203,1	1min18s	0,8 x 1,1	4,6	113	205,9	207,7	
	6	47,5	22,6	15:00	209,0	3min12s	3,3 x 5,6	202,2	1min22s	0,8 x 1,1	6,8	110	209	208,1	
	7	47,2	20,9	15:00	211,4	3min11s	3,3 x 5,6	202,6	1min21s	0,8 x 1,1	8,8	110	209,4	211	
	8	45,4	21,2	15:00	209,8	3min03s	3,3 x 5,3	206,8	0min54s	0,8 x 1,1	3,0	69	211,4	209,8	
28.5.2008															
cca 15:00 NOAA-15	1	44,1	26,9	15:05	203,6	7min57s	3,4 x 5,2	196,5	9min13s	1,2 x 1,1	7,1	-76	207,7	205	
	2	44,5	28,1	15:05	209,4	7min58s	3,5 x 5,3	205,6	9min18s	1,4 x 1,1	3,8	-80	210,2	208,5	
29.5.2008 - 30.5.2008															
cca 15:45 NOAA-16	1	50,2	8,0	15:45	209,4	48min23s	3,2 x 6,0	200,1	47min23s	0,9 x 1,1	9,3	60	207,3	207,7	
	2	50,2	7,1	15:45	205,9	48min23s	3,2 x 6,0	202,2	47min25s	0,9 x 1,1	3,7	62	210,2	206,8	
	3	49,6	7,8	15:45	210,6	48min21s	3,2 x 5,9	205,0	47min14s	0,9 x 1,1	5,6	67	217,4	207,3	
cca 16:30 NOAA-15	4	50,3	8,8	16:25	206,8	28min24s	3,2 x 6,0	204,8	27min53s	1,6 x 1,1	2,0	31	206,8	204,1	
	5	50,3	8,1	16:25	207,7	28min24s	3,2 x 6,0	203,1	27min54s	1,5 x 1,1	4,6	30	206,8	205,4	
	6	50,5	8,0	16:25	213,0	28min24s	3,2 x 6,0	208,0	27min56s	1,5 x 1,1	5,0	28	210,6	209,8	
	7	50,3	7,2	16:25	207,7	28min23s	3,2 x 6,0	205,2	27min55s	1,4 x 1,1	2,5	28	208,5	208,1	
	8	49,9	7,6	16:25	205,9	28min22s	3,2 x 5,9	206,9	27min45s	1,4 x 1,1	-1,0	37	207,3	208,1	
cca 20:45 NOAA-17	9	48,3	8,7	20:40	204,1	48min16s	3,2 x 5,6	195,0	42min47s	0,8 x 1,1	9,1	29	206,4	203,6	
	10	48,1	7,9	20:40	204,1	48min15s	3,2 x 5,6	198,9	42min48s	0,8 x 1,1	5,2	27	204,1	204,1	
cca 1:30 NOAA-18	11	50,5	7,4	1:35	209,8	38min24s	3,2 x 6,0	197,7	39min20s	0,9 x 1,1	12,1	56	212,9	208,9	

cca 4:00 NOAA-16	12	50,7	7,5	4:00	208,1	3min25s	3,2 x 6,1	204,9	4min06s	2,4 x 1,1	3,2	41	206,4	207,4
	13	50,8	7,2	4:00	207,7	3min25s	3,2 x 6,1	204,5	4min03s	2,5 x 1,1	3,2	38	207,7	208,5
31.5.2008														
cca 13:00 NOAA-18	1	50,8	11,2	13:00	209,4	3min25s	3,2 x 6,1	207,2	0min57s	2,0 x 1,1	2,2	148	207,3	205,0
	2	50,7	11,9	13:00	207,7	3min25s	3,2 x 6,1	206,1	0min55s	2,4 x 1,1	1,6	150	210,6	203,6
cca 15:30 NOAA-15	3	52,2	11,5	15:35	205,0	38min30s	3,2 x 6,4	198,4	40min18s	0,8 x 1,1	6,6	-138	206,4	205,9
	4	52,0	11,6	15:35	205,4	38min29s	3,2 x 6,3	198,4	40min15s	0,8 x 1,1	7,0	-136	205,5	205,5
	5	51,2	11,3	15:35	205,5	38min27s	3,2 x 6,2	194,4	40min04s	0,8 x 1,1	11,1	-97	205,9	205,9
	6	50,9	11,6	15:35	206,4	38min26s	3,2 x 6,1	202,6	39min57s	0,8 x 1,1	3,8	-91	205,9	205,9
	7	51,1	13,5	15:35	205,5	38min26s	3,2 x 6,2	195,4	39min57s	0,9 x 1,1	10,1	-91	204,1	203,2
	8	50,1	18,8	15:35	208,1	38min22s	3,3 x 6,1	202,1	39min33s	1,3 x 1,1	6,0	-71	208,1	208,5
	9	49,6	19,1	15:35	208,1	38min20s	3,3 x 6,0	203,4	39min22s	1,3 x 1,1	4,7	-62	209,0	208,5
	10	49,4	21,5	15:35	206,8	38min19s	3,3 x 5,9	203,4	39min17s	1,7 x 1,1	3,4	-58	209,4	207,3
	11	49,2	21,8	15:35	206,8	38min18s	3,3 x 5,9	202,6	39min14s	1,7 x 1,1	4,2	-56	208,5	205,5
	12	48,5	21,4	15:35	203,6	38min16s	3,3 x 5,8	201,7	39min02s	1,6 x 1,1	1,9	-46	206,4	206,4
	13	42,9	22,7	15:35	207,7	37min52s	3,3 x 5,0	205,1	37min28s	1,7 x 1,1	2,6	24	204,1	207,7
cca 19:45 MetOp	14	50,2	10,3	19:45	208,1	48min30s	3,2 x 6,4	206,7	50min	n/a	1,4	-90	208,5	209,0
	15	51,5	12,1	19:45	207,7	48min28s	3,2 x 6,2	202,8	49min43s	n/a	4,9	-75	208,1	207,3
	16	51,7	12,1	19:45	209,8	48min28s	3,2 x 6,3	201,5	49min45s	n/a	8,3	-77	212,2	206,8
	17	51,0	14,5	19:45	209,4	48min26s	3,2 x 6,2	202,4	49min27s	n/a	7	-61	211,0	208,5
	18	50,3	14,6	19:45	205,9	48min23s	3,2 x 6,0	200,2	49min16s	n/a	5,7	-53	205,5	205,9
	19	50,2	14,6	19:45	206,4	48min23s	3,2 x 6,0	203,2	49min13s	n/a	3,2	-50	205,0	207,3
	20	50,1	14,9	19:45	208,5	48min23s	3,2 x 6,0	203,2	49min10s	n/a	5,3	-47	207,7	207,7
	21	50,3	15,3	19:45	207,3	48min23s	3,2 x 6,0	203,2	49min14s	n/a	4,1	-61	205,5	207,7
	22	45,7	24,5	19:45	213,4	48min04s	3,3 x 5,4	204,4	47min37s	n/a	9	27	214,5	212,6
	23	45,9	23,8	19:45	208,5	48min05s	3,3 x 5,4	206,7	47min41s	n/a	1,8	24	207,7	209,4
	24	45,6	22,5	19:45	208,1	48min04s	3,3 x 5,4	201,9	47min40s	n/a	6,2	24	207,3	207,3
	25	47,0	20,5	19:45	208,5	48min10s	3,3 x 5,5	201,5	48min06s	n/a	7	4	208,5	208,5
	26	47,1	20,9	19:45	205,0	48min10s	3,3 x 5,5	200,2	48min07s	n/a	4,8	3	205,5	204,6
	27	47	21,2	19:45	206,4	48min10s	3,3 x 5,5	200,2	48min04s	n/a	6,2	6	205,5	205,5
	28	46,5	21,0	19:45	206,8	48min08s	3,3 x 5,5	201,1	47min58s	n/a	5,7	10	209,8	208,1
	29	47,8	22,8	19:45	206,8	48min13s	3,3 x 5,7	201,9	48min15s	n/a	4,9	-2	207,3	206,4
	30	47,5	23,2	19:45	208,1	48min13s	3,3 x 5,7	203,6	48min08s	n/a	4,5	5	208,1	208,5
cca 20:00 NOAA-17	31	51,5	12,1	19:55	208,1	58min28s	3,2 x 6,2	205,5	57min10s	0,9 x 1,1	2,6	78	207,3	206,4
	32	51,7	12,1	19:55	206,8	58min28s	3,2 x 6,3	203,6	57min13s	0,9 x 1,1	3,2	75	206,8	209,0
	33	51,0	14,3	19:55	209,8	58min26s	3,2 x 6,2	203,6	56min54s	0,9 x 1,1	6,2	92	208,5	210,6
	34	50,5	14,6	19:55	205,9	58min24s	3,2 x 6,0	202,1	56min46s	0,9 x 1,1	3,8	98	205,9	204,6
	35	50,3	14,6	19:55	205,5	58min23s	3,2 x 6,0	202,5	56min43s	0,9 x 1,1	3	100	207,3	204,6
	36	50,0	14,8	19:55	207,7	58min22s	3,2 x 6,0	202,5	56min37s	0,9 x 1,1	5,2	105	207,7	208,1
	37	50,3	15,3	19:55	208,1	58min23s	3,2 x 6,0	205,1	56min41s	0,9 x 1,1	3	102	207,7	208,5
	38	45,7	24,6	19:50	212,6	53min04s	3,3 x 5,4	203,6	55min05s	0,8 x 1,1	9	-121	213,4	211,8
	39	45,9	23,8	19:50	209,4	53min05s	3,3 x 5,4	205,1	55min08s	0,8 x 1,1	4,3	-123	208,5	208,1
	40	45,4	22,4	19:50	209,0	53min03s	3,3 x 5,3	204,0	55min01s	0,8 x 1,1	5	-118	208,5	209,8
	41	47,0	21,0	19:50	204,6	53min10s	3,3 x 5,5	199,7	55min31s	0,8 x 1,1	4,9	-141	205,0	204,1
	42	47,0	21,3	19:50	205,5	53min10s	3,3 x 5,5	201,3	55min30s	0,8 x 1,1	4,2	-140	206,4	205,5
	43	46,6	21,0	19:50	208,1	53min08s	3,3 x 5,5	198,5	55min25s	0,8 x 1,1	9,6	-137	206,8	206,4
	44	47,8	22,9	19:50	206,4	53min13s	3,3 x 5,7	202,9	55min42s	0,8 x 1,1	3,5	-149	206,8	206,4
	45	47,3	22,8	19:50	208,1	53min11s	3,3 x 5,6	204,8	55min33s	0,8 x 1,1	3,3	-144	209,0	208,1
1.6.2008														
cca 15:15 NOAA-15	1	50,9	14,2	15:10	206,4	13min25s	3,2 x 6,1	201,3	15min55s	0,8 x 1,1	5,1	-150	208,6	208,6
	2	50,3	14,9	15:10	210,2	13min23s	3,2 x 6,0	203,5	15min45s	0,8 x 1,1	6,7	-142	209,0	209,8
	3	49,7	14,4	15:10	210,2	13min21s	3,2 x 5,9	199,9	15min38s	0,8 x 1,1	10,3	-137	211,0	207,7
	4	49,9	15,6	15:10	207,3	13min22s	3,2 x 6,0	199,4	15min37s	0,8 x 1,1	7,9	-135	205,0	206,8
	5	47,7	14,2	15:10	211,4	13min13s	3,2 x 5,6	203,9	15min05s	0,8 x 1,1	7,5	-112	211,4	211,0

	6	48,2	15,5	15:10	208,1	13min15s	3,2 x 5,7	203,9	15min10s	0,8 x 1,1	4,2	-115	211,4	206,8
	7	47,8	15,0	15:10	209,4	13min14s	3,2 x 5,6	202,6	15min05s	0,8 x 1,1	6,8	-111	209,8	209,8
	8	47,7	14,9	15:10	209,4	13min13s	3,2 x 5,6	203,5	15min04s	0,8 x 1,1	5,9	-111	210,6	208,1
	9	47,5	16,1	15:10	208,6	13min12s	3,2 x 5,5	203,0	14min57s	0,8 x 1,1	5,6	-105	208,6	208,1
	10	47,5	19,4	15:10	206,4	13min12s	3,3 x 5,6	200,4	14min48s	0,8 x 1,1	6,0	-96	208,6	209,8
	11	46,4	24,6	15:10	208,1	13min03s	3,4 x 5,5	201,3	14min20s	1,1 x 1,1	6,8	-77	209,0	208,6
	12	42,5	26,2	15:10	206,4	12min49s	3,4 x 5,0	203,0	13min14s	1,2 x 1,1	3,4	-25	207,3	206,8
	13	41,9	27,2	15:10	205,0	12min46s	3,4 x 4,9	202,6	13min03s	1,3 x 1,1	2,4	-17	209,4	207,3
	14	41,9	27,4	15:10	206,4	12min46s	3,4 x 5,0	205,2	13min02s	1,4 x 1,1	1,2	-16	208,6	206,4
cca 19:30 NOAA-17	15	48,0	17,6	19:30	206,4	33min14s	3,2 x 5,6	203,7	32min49s	1,2 x 1,1	2,7	25	206,0	206,8
	16	43,3	23,3	19:30	209,4	32min54s	3,3 x 5,0	205,2	31min16s	0,9 x 1,1	4,2	98	212,2	210,6
	17	43,2	23,8	19:30	207,7	32min53s	3,3 x 5,0	202,9	31min14s	0,9 x 1,1	4,8	99	208,6	205,0
	18	43,2	23,9	19:30	206,4	32min53s	3,3 x 5,0	203,3	31min13s	0,9 x 1,1	3,1	100	208,1	205,0
25.6.2008														
cca 15:45 NOAA-15	1	50,7	15,4	15:40	211,8	43min25s	3,2 x 6,1	207,7	42min19s	1,0 x 1,1	4,1	66	212,6	212,2
	2	50,4	13,5	15:40	210,2	43min24s	3,2 x 6,0	206,9	42min17s	0,9 x 1,1	3,3	67	211,4	212,6
	3	50,3	13,3	15:40	211,4	43min23s	3,2 x 6,0	204,5	42min16s	0,9 x 1,1	6,9	67	212,6	209,8
	4	50,3	13,1	15:40	212,2	43min23s	3,2 x 6,0	205,3	42min16s	0,9 x 1,1	6,9	67	212,2	209,8
	5	50,0	12,9	15:40	208,1	43min22s	3,2 x 6,0	202,8	42min12s	0,9 x 1,1	5,3	70	208,6	208,1
cca 20:15 NOAA-17	6	49,1	17,8	20:15	209,0	18min19s	3,2 x 5,8	204,8	16min58s	0,9 x 1,1	4,2	81	209,8	209,0
	7	48,6	16,0	20:15	207,3	18min17s	3,2 x 5,7	201,7	16min54s	0,8 x 1,1	5,6	83	204,6	207,3
	8	48,4	16,2	20:15	209,8	18min16s	3,2 x 5,7	202,5	16min51s	0,8 x 1,1	7,3	85	206,4	209,4
12.7.2008														
cca 15:30 NOAA-15	1	48,5	14,2	15:30	212,2	33min17s	3,2 x 5,7	206,6	35min23s	0,8 x 1,1	5,6	-126	211,8	211,8
	2	48,1	14,5	15:30	211,0	33min15s	3,2 x 5,6	205,4	35min14s	0,8 x 1,1	5,6	-119	211,3	210,6
	3	45,7	11,5	15:30	209,8	33min05s	3,2 x 5,2	202,4	34min44s	0,8 x 1,1	7,4	-99	211,3	212,2
13.7.2008														
cca 15:15 NOAA-15	1	50,9	21,2	15:10	215,6	13min25s	3,3 x 6,3	208,0	11min49s	0,9 x 1,1	7,6	96	216,4	218,1
	2	50,6	19,3	15:10	213,8	13min24s	3,3 x 6,2	205,2	11min49s	0,8 x 1,1	8,6	95	214,1	215,6
	3	50,7	18,9	15:10	211,4	13min24s	3,3 x 6,2	204,4	11min49s	0,8 x 1,1	7,0	95	213,8	213,0
	4	47,1	16,6	15:10	211,0	13min11s	3,2 x 5,5	206,8	10min58s	0,8 x 1,1	4,2	133	211,8	210,6
	5	46,7	16,4	15:10	207,7	13min09s	3,2 x 5,4	202,2	10min53s	0,8 x 1,1	5,5	136	209,4	209,8
14.7.2008 - 15.7.2008														
cca 19:30 NOAA-17	1	52,2	27,4	19:35	212,2	38min29s	3,5 x 6,8	203,7	36min58s	0,9 x 1,1	8,5	-91	212,6	214,5
cca 0:15 NOAA-18	2	54,8	29,6	0:15	210,6	18min37s	3,6 x 7,6	208,5	18min42s	1,1 x 1,1	2,1	-5	210,6	211,0
	3	49,3	26,1	0:15	211,4	18min18s	3,4 x 7,1	209,9	20min20s	0,9 x 1,1	1,5	-122	214,5	213,8
1.8.2008														
cca 16:00 NOAA-15	1	41,8	14,2	15:55	208,6	57min39s	3,1 x 4,8	205,4	55min29s	1,1 x 1,1	3,2	130	210,6	207,7
	2	44,8	7,6	15:55	208,6	58min01s	3,1 x 5,1	203,3	56min32s	0,8 x 1,1	5,3	89	211,0	208,6
	3	46,7	9,0	15:55	210,2	58min09s	3,2 x 5,4	202,4	57min03s	0,8 x 1,1	7,8	126	211,0	210,6
	4	46,6	13,7	15:55	209,8	58min09s	3,2 x 5,4	207,9	56min51s	1,2 x 1,1	1,9	78	210,6	212,2
cca 21:00 NOAA-17	5	52,2	10,3	20:55	211,0	58min30s	3,2 x 6,4	206,3	0min35s	1,3 x 1,1	4,7	-115	215,3	209,4
	6	45,8	9,5	20:55	207,3	58min05s	3,2 x 5,2	204,8	58min48s	1,0 x 1,1	2,5	-43	207,3	208,6
	7	45,8	10,6	20:55	208,1	58min05s	3,2 x 5,2	204,4	58min47s	1,2 x 1,1	3,7	-42	208,1	207,3
19.8.2008														
cca 0:45 NOAA-18	1	62,8	36,8	0:50	212,2	53min58s	4,3 x 12,1	209,5	52min53s	1,0 x 1,1	2,7	65	212,2	212,6
	2	64,4	37,5	0:50	209,4	54min01s	4,4 x 13,5	207,1	52min16s	1,0 x 1,1	2,3	105	210,2	209,8
4.9.2008														
cca 21:00 NOAA-17	1	45,1	5,1	21:05	207,7	8min02s	3,2 x 5,2	200,5	10min30s	1,0 x 1,1	7,2	-148	207,3	208,1
	2	44,9	4,8	21:05	204,1	8min02s	3,2 x 5,1	197,2	10min27s	0,9 x 1,1	6,9	-145	201,2	204,1
	3	44,4	4,2	21:05	207,3	7min59s	3,2 x 5,1	198,9	10min21s	0,9 x 1,1	8,4	-142	208,1	205,5

	4	43,6	4,5	21:05	204,6	7min56s	3,2 x 5,0	202,5	10min08s	0,9 x 1,1	2,1	-132	211,0	209,0
26.10.2008														
cca 0:45 NOAA-18	1	39,0	9,9	0:50	208,1	52min34s	3,1 x 4,5	204,4	52min16s	1,6 x 1,1	3,7	18	207,3	207,7
	2	38,9	10,7	0:50	205,9	52min34s	3,1 x 4,4	204,0	52min17s	1,5 x 1,1	1,9	17	206,8	206,4
	3	38,6	10,1	0:50	205,5	52min32s	3,1 x 4,4	202,9	52min24s	1,6 x 1,1	2,6	8	208,1	205,9
	4	38,4	10,6	0:50	205,9	52min31s	3,1 x 4,4	205,2	52min26s	1,5 x 1,1	0,7	5	206,8	206,4
	5	38,1	11,0	0:50	208,1	52min30s	3,1 x 4,4	205,2	52min29s	1,4 x 1,1	2,9	1	206,8	205,9
cca 5:15 NOAA-15	6	37,7	10,7	5:15	208,5	17min27s	3,1 x 4,3	203,6	19min08s	1,9 x 1,1	4,9	-101	209,4	205,9
	7	37,5	11,3	5:15	206,8	17min27s	3,1 x 4,3	202,8	19min08s	2,1 x 1,1	4,0	-101	204,1	208,1
	8	37,5	11,4	5:15	205,5	17min27s	3,1 x 4,3	204,1	19min07s	2,1 x 1,1	1,4	-100	204,1	207,3
	9	36,6	11,5	5:15	206,4	17min22s	3,1 x 4,2	203,2	19min22s	2,3 x 1,1	3,2	-120	206,4	203,6
cca 9:00 MetOp	10	36	11,5	9:05	205,9	7min19s	3,1 x 4,2	197,2	5min33s	n/a	8,7	116	204,1	201,7
	11	36,1	12,0	9:05	203,6	7min19s	3,1 x 4,2	190,5	5min30s	n/a	13,1	119	203,2	202,7
	12	36,5	12,3	9:05	208,6	7min22s	3,1 x 4,3	200,4	5min19s	n/a	8,2	123	206,8	209,0
	13	36,7	12,5	9:05	206,8	7min22s	3,1 x 4,3	200,8	5min17s	n/a	6,0	125	207,7	206,8
cca 9:45 NOAA-17	14	35,8	11,5	9:40	204,6	42min18s	3,1 x 4,2	198,3	43min29s	1,1 x 1,1	6,3	-71	202,7	205,9
	15	35,8	12,0	9:40	204,1	42min18s	3,1 x 4,2	200,4	43min27s	1,1 x 1,1	3,7	-69	203,2	205,0
	16	35,9	12,1	9:40	205,5	42min18s	3,1 x 4,2	197,9	43min25s	1,2 x 1,1	7,6	-67	206,8	206,8
	17	35,9	12,5	9:40	208,6	42min18s	3,1 x 4,2	204,0	43min24s	1,2 x 1,1	4,6	-66	209,8	205,0
	18	36,5	12,7	9:40	207,3	42min21s	3,1 x 4,2	203,6	43min14s	1,2 x 1,1	3,7	-53	206,8	207,7
cca 12:15 NOAA-18	19	35,0	13,6	12:15	205,5	17min13s	3,1 x 4,1	201,4	16min46s	0,8 x 1,1	4,1	27	206,4	207,7
	20	35,0	13,8	12:15	207,7	17min14s	3,1 x 4,1	203,3	16min46s	0,8 x 1,1	4,4	28	205,9	209,0
	21	35,3	13,9	12:15	207,7	17min15s	3,1 x 4,1	203,0	16min50s	0,8 x 1,1	4,7	25	209,0	206,4
	22	36,4	14,4	12:15	209,8	17min21s	3,1 x 4,2	204,9	17min08s	0,8 x 1,1	4,9	13	210,2	210,6
6.11.2008 - 7.11.2008														
cca 8:45 NOAA-17	1	39,8	18,2	8:45	208,1	47min38s	3,2 x 4,6	202,8	46min48s	0,9 x 1,1	5,3	50	210,2	210,2
	2	39,5	17,9	8:45	198,7	47min36s	3,2 x 4,5	196,6	46min55s	0,9 x 1,1	2,1	41	200,2	202,2
	3	37,7	18,1	8:45	211,8	47min27s	3,2 x 4,4	204,0	47min24s	0,8 x 1,1	7,8	3	210,2	211,0
	4	36,8	17,2	8:45	204,6	47min22s	3,1 x 4,3	194,8	47min41s	0,9 x 1,1	9,8	-19	201,2	204,6
	5	34,1	14,8	8:45	203,1	47min08s	3,1 x 4,1	198,8	48min30s	1,0 x 1,1	4,3	-82	n/a	208,5
cca 12:00 NOAA-18	6	39,2	18,4	12:00	201,2	2min35s	3,2 x 4,5	198,0	2min57s	0,8 x 1,1	3,2	-22	201,7	201,7
	7	38,7	18,6	12:00	202,2	2min32s	3,2 x 4,5	198,0	2min48s	0,8 x 1,1	4,2	-16	205,5	204,1
	8	35,9	16,3	12:00	203,7	2min18s	3,1 x 4,2	200,5	2min13s	0,8 x 1,1	3,2	5	207,7	204,6
cca 12:15 Aqua	9	39,3	18,4	12:15	203,2	17min27s	3,2 x 4,5	201,0	17min31s	n/a	2,2	-4	202,7	204,1
	10	38,8	18,5	12:15	204,6	17min25s	3,2 x 4,5	198,6	17min29s	n/a	6,0	-4	202,7	202,7
	11	35,9	16,4	12:15	203,7	17min10s	3,1 x 4,2	198,9	16min45s	n/a	4,8	25	206,4	205,0
	12	35,4	15,5	12:15	205,9	17min07s	3,1 x 4,2	204,4	16min40s	n/a	1,5	27	207,3	209,0
cca 15:30 NOAA-15	13	37,8	19,0	15:30	207,7	32min28s	3,2 x 4,4	203,8	34min23s	1,1 x 1,1	3,9	-115	207,7	206,4
	14	37,0	18,2	15:30	208,1	32min24s	3,2 x 4,3	204,7	34min11s	1,0 x 1,1	3,4	-107	207,7	207,7
	15	35,9	16,2	15:30	203,1	32min18s	3,1 x 4,2	198,0	33min57s	0,8 x 1,1	5,1	-99	201,7	202,2
cca 16:00 NOAA-16	16	37,9	19,1	15:55	205,9	57min28s	3,2 x 4,4	204,6	58min10s	1,5 x 1,1	1,3	-42	207,3	206,8
	17	37,1	18,4	15:55	206,4	57min24s	3,2 x 4,3	201,4	57min57s	1,3 x 1,1	5,0	-33	207,7	206,8
	18	36,0	16,4	15:55	204,6	57min18s	3,1 x 4,2	195,7	57min43s	1,1 x 1,1	8,9	-25	204,1	202,7
	19	36,3	15,7	15:55	207,3	57min20s	3,1 x 4,2	201,0	57min49s	1,0 x 1,1	6,3	-29	209,4	206,4
	20	36,4	15,6	15:55	206,4	57min24s	3,1 x 4,2	202,6	57min52s	1,0 x 1,1	3,8	-28	205,5	206,4
	21	36,6	15,7	15:55	207,7	57min25s	3,1 x 4,3	205,3	57min54s	1,0 x 1,1	2,4	-29	211,8	208,1
cca 20:00 NOAA-17	22	37,1	17,4	20:05	203,2	7min24s	3,2 x 4,3	200,1	6min14s	0,8 x 1,1	3,1	70	203,2	203,1
	23	36,8	17,3	20:05	204,1	7min23s	3,1 x 4,3	201,0	6min11s	0,8 x 1,1	3,1	72	205,0	203,6
	24	36,8	17,2	20:05	205,0	7min23s	3,1 x 4,3	202,5	6min10s	0,8 x 1,1	2,5	73	203,6	203,1
	25	36,8	17,1	20:05	205,0	7min23s	3,1 x 4,3	201,0	6min10s	0,8 x 1,1	4,0	73	205,0	205,0
	26	36,0	16,5	20:05	205,9	7min18s	3,1 x 4,2	199,3	5min58s	0,8 x 1,1	6,6	80	206,8	205,9
cca 0:30 NOAA-18	27	38,1	18,4	0:25	204,1	7min29s	3,2 x 4,4	200,9	26min44s	1,3 x 1,1	3,2	45	203,6	204,1
	28	36,8	17,6	0:25	202,7	7min23s	3,2 x 4,3	200,9	27min19s	1,3 x 1,1	1,8	4	202,2	203,1

25.5.2009 - 26.5.2009															
cca 11:15 Terra	1	50,2	4,6	11:20	206,4	23min23s	3,2 x 6,0	199,2	23min06s	n/a	7,2	17	203,6	206,4	
cca 12:15 NOAA-18	2	50,3	5,1	12:15	205,9	18min23s	3,2 x 6,0	199,9	16min54s	1,0 x 1,1	6,0	89	207,7	205,9	
	3	50,4	5,3	12:15	207,3	18min24s	3,2 x 6,1	196,4	16min57s	1,0 x 1,1	10,9	87	207,7	207,3	
	4	48,3	9,0	12:15	212,6	18min16s	3,2 x 5,6	204,6	16min11s	0,9 x 1,1	8,0	125	207,7	208,6	
cca 15:45 NOAA-15	5	50,1	0,2	15:50	211,4	53min22s	3,3 x 6,0	201,2	51min11s	0,9 x 1,1	10,2	131	213,0	212,2	
	6	50,1	0,4	15:50	211,3	53min22s	3,3 x 6,0	201,7	51min11s	0,9 x 1,1	9,6	131	213,4	208,6	
	7	50,4	0,4	15:50	206,8	53min24s	3,3 x 6,0	201,7	51min16s	0,8 x 1,1	5,1	128	207,7	206,8	
	8	50,8	1,2	15:50	203,7	53min25s	3,2 x 6,2	197,0	51min19s	0,8 x 1,1	6,7	126	203,6	205,0	
	9	51,4	2,3	15:50	207,7	53min27s	3,2 x 6,3	203,0	51min26s	0,8 x 1,1	4,7	121	212,6	209,8	
	10	50,2	7,0	15:50	210,6	53min23s	3,2 x 6,0	201,2	50min56s	0,8 x 1,1	9,4	144	212,2	214,5	
	11	50,9	7,5	15:50	205,9	53min26s	3,2 x 6,1	199,9	51min08s	0,8 x 1,1	6,0	138	207,3	209,0	
	12	45,4	7,6	15:45	206,8	48min04s	3,2 x 5,2	202,6	49min37s	0,8 x 1,1	4,2	-93	209,8	207,3	
	13	47,0	14,3	15:45	207,3	48min11s	3,2 x 5,5	203,9	49min52s	1,4 x 1,1	3,4	-101	208,1	210,2	
	14	46,7	14,3	15:45	209,0	48min09s	3,2 x 5,4	208,0	49min47s	1,4 x 1,1	1,0	-96	210,2	210,2	
	15	46,5	14,8	15:45	207,7	48min08s	3,2 x 5,4	204,3	49min43s	1,5 x 1,1	3,4	-95	207,7	207,7	
	16	47,0	15,9	15:45	207,3	48min10s	3,2 x 5,5	203,0	49min50s	1,7 x 1,1	4,3	-100	209,0	207,7	
cca 16:45 NOAA-16	17	43,9	1,5	16:50	213,4	52min57s	3,2 x 5,0	203,1	55min02s	0,8 x 1,1	10,3	-125	209,0	213,0	
	18	44,0	1,5	16:50	211,3	52min57s	3,2 x 5,0	199,8	55min05s	0,8 x 1,1	11,5	-128	210,2	209,4	
	19	44,4	1,8	16:50	208,6	52min59s	3,2 x 5,1	201,9	55min11s	0,8 x 1,1	6,7	-132	207,7	211,4	
	20	47,9	0,6	16:55	210,6	58min14s	3,2 x 5,6	200,6	56min09s	0,8 x 1,1	10,0	125	213,0	209,0	
	21	51,2	1,9	16:55	204,6	58min26s	3,2 x 6,2	196,1	57min01s	0,8 x 1,1	8,5	85	205,5	207,7	
	22	50,1	7,4	16:55	208,1	58min23s	3,2 x 6,0	205,1	56min33s	1,2 x 1,1	3,0	110	206,8	208,6	
	23	46,4	8,3	16:50	207,7	53min08s	3,2 x 5,3	206,3	55min29s	1,1 x 1,1	1,4	-141	207,7	209,0	
	24	47,6	10,7	16:50	208,6	53min13s	3,2 x 5,5	205,9	55min48s	1,5 x 1,1	2,7	-155	207,3	208,6	
cca 21:00 NOAA-17	25	52,1	4,0	21:00	206,4	3min30s	3,2 x 6,4	200,4	4min44s	1,3 x 1,1	6,0	-74	208,6	208,6	
	26	49,9	2,7	21:00	207,7	3min22s	3,2 x 6,0	202,8	4min09s	1,1 x 1,1	4,9	-47	208,6	208,1	
	27	49,8	2,1	21:00	203,2	3min22s	3,2 x 6,0	199,5	4min10s	1,1 x 1,1	3,7	-48	205,0	202,7	
	28	49,6	2,3	21:00	208,1	3min20s	3,2 x 5,9	200,8	4min03s	1,1 x 1,1	7,3	-43	205,9	211,0	
	29	48,2	2,9	21:00	206,4	3min15s	3,2 x 5,7	200,8	3min41s	1,1 x 1,1	5,6	-26	206,8	207,7	
	30	47,5	2,6	21:00	206,8	3min12s	3,2 x 5,5	199,1	3min29s	1,0 x 1,1	7,7	-17	204,6	205,9	
	31	47,6	6,8	21:00	209,8	3min13s	3,2 x 5,5	205,0	3min27s	1,6 x 1,1	4,8	-14	214,1	209,8	
cca 21:00 MetOp (srovnání stejných OTs jako předchozí případ)	25	52,1	4,0	21:00	206,4	3min30s	3,2 x 6,4	196,8	4min09s	n/a	9,6	-39	208,6	208,6	
	26	49,9	2,7	21:00	207,7	3min22s	3,2 x 6,0	201,3	3min35s	n/a	6,4	-13	208,6	208,1	
	27	49,8	2,1	21:00	203,2	3min22s	3,2 x 6,0	198,2	3min37s	n/a	5,0	-15	205,0	202,7	
	28	49,6	2,3	21:00	208,1	3min20s	3,2 x 5,9	198,2	3min30s	n/a	9,9	-10	205,9	211,0	
	29	48,2	2,9	21:00	206,4	3min15s	3,2 x 5,7	200,8	3min08s	n/a	5,6	7	206,8	207,7	
	30	47,5	2,6	21:00	206,8	3min12s	3,2 x 5,5	198,2	2min56s	n/a	8,6	16	204,6	205,9	
	31	47,6	6,8	21:00	209,8	3min13s	3,2 x 5,5	204,2	2min51s	n/a	5,6	22	214,1	209,8	
cca 2:15 NOAA-18	32	53	6,9	2:10	208,6	13min33s	3,2 x 6,6	200,7	14min36s	0,9 x 1,1	7,9	-63	208,1	207,7	
	33	52,8	5,7	2:10	205,5	13min32s	3,2 x 6,6	200,7	14min43s	0,8 x 1,1	4,8	-71	206,4	205,9	
	34	52,2	5,1	2:10	204,1	13min30s	3,2 x 6,4	198,1	14min54s	0,8 x 1,1	6,0	-84	202,7	204,6	
	35	47,3	6,9	2:15	207,3	18min12s	3,2 x 5,5	205,7	16min07s	1,0 x 1,1	1,6	125	207,7	205,9	
	36	47,7	7,1	2:15	207,3	18min13s	3,2 x 5,5	204,9	16min0s	1,0 x 1,1	2,4	133	210,2	205,5	

¹ Značí číslo přestřelujícího vrcholu uvedené pro snadnější orientaci v náhledových snímcích (příloha 4).

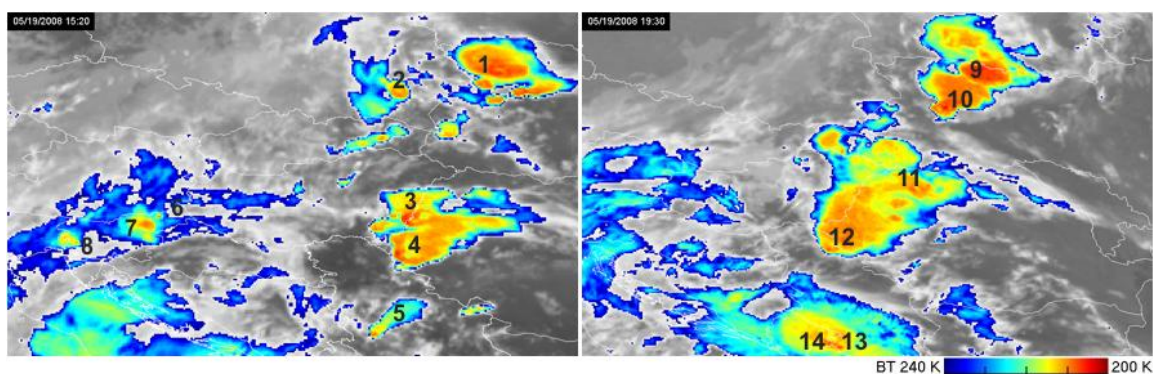
² Rozlišení u dat z družic NOAA bylo odečteno v programu 2met!® Vision+. Dle uvedených údajů je zřejmé, že software zobrazuje nesprávné hodnoty - asi v důsledku jednoduché geometrické korekce. Údaje jsou uváděny pouze pro informaci.

³ Rozdíl v jasové teplotě a času snímání je brán vzhledem k datům z polární družice.

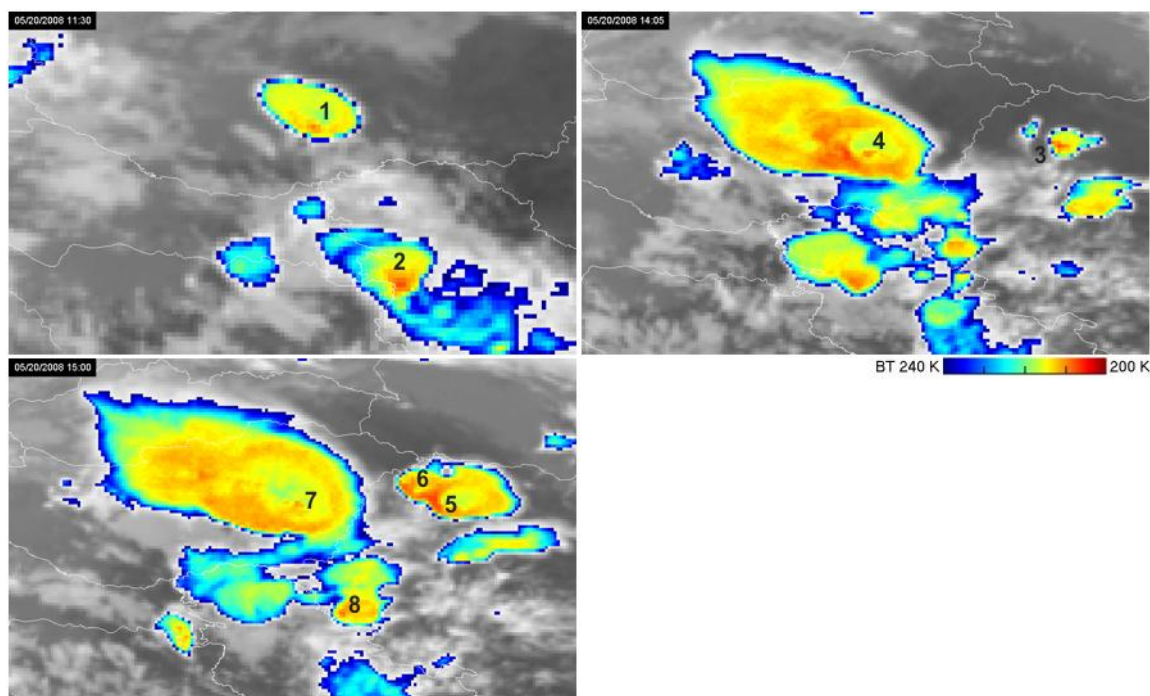
(zdroj dat: archiv ČHMÚ)

Příloha 4 Poloha detekovaných přestřelujících vrcholů na snímcích MSG

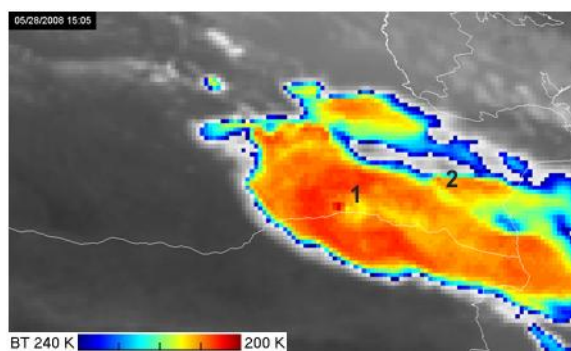
Příloha 4.1: Konvektivní bouře z 19. 5. 2008



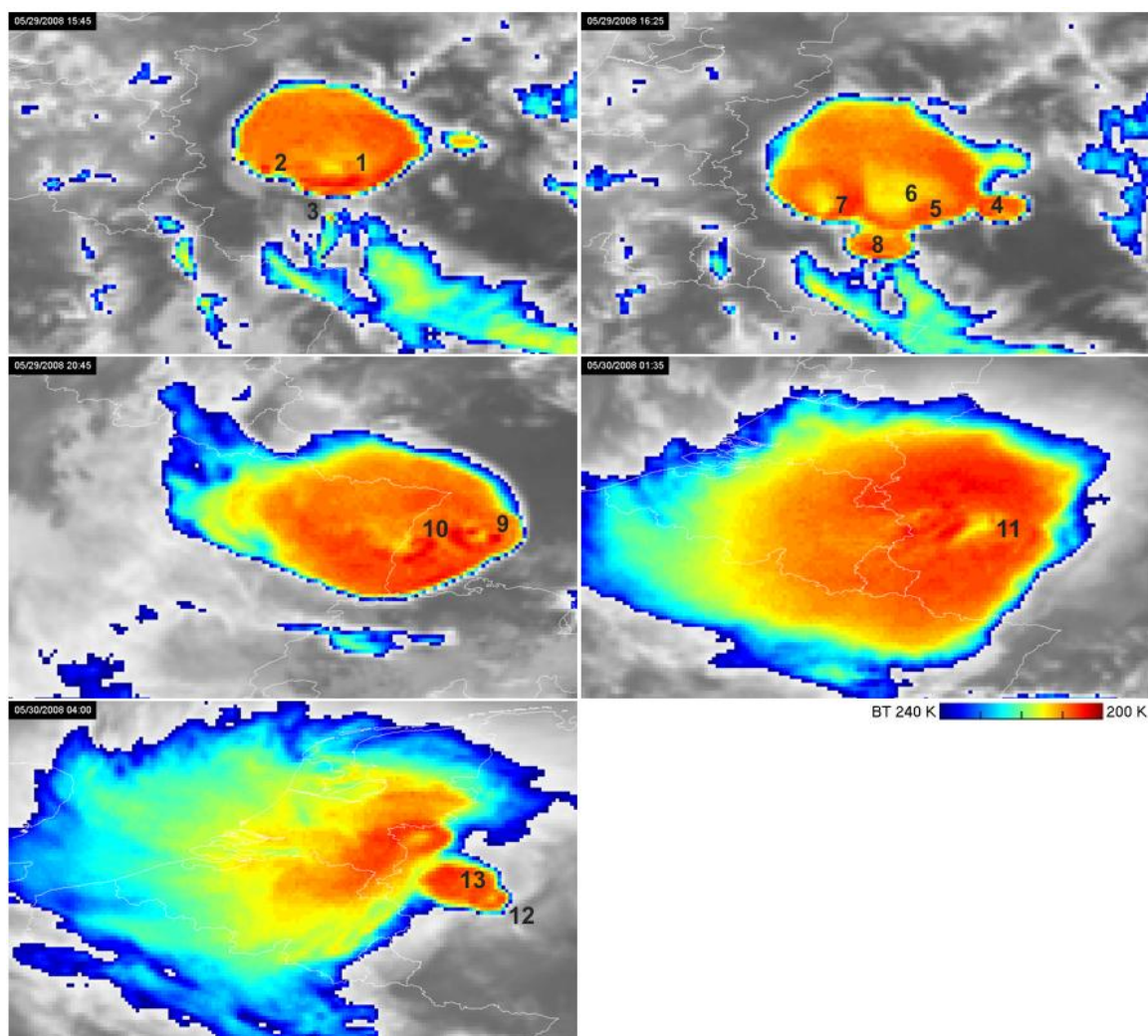
Příloha 4.2: Konvektivní bouře z 20. 5. 2008



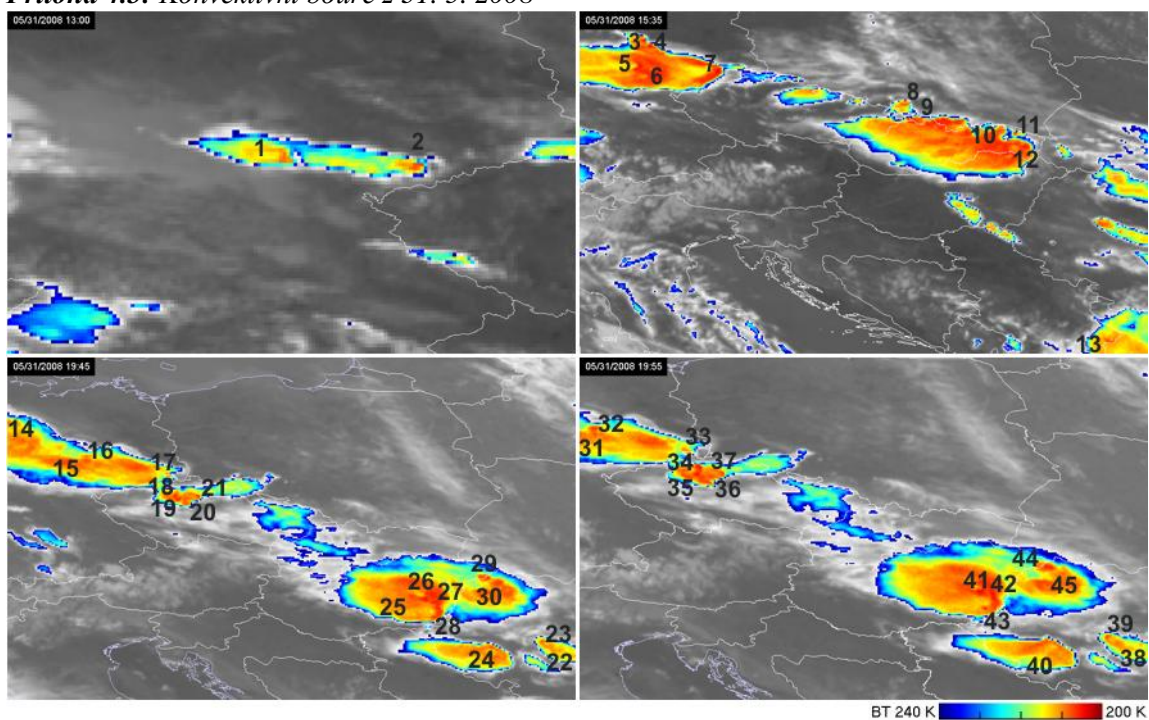
Příloha 4.3: Konvektivní bouře z 28. 5. 2008



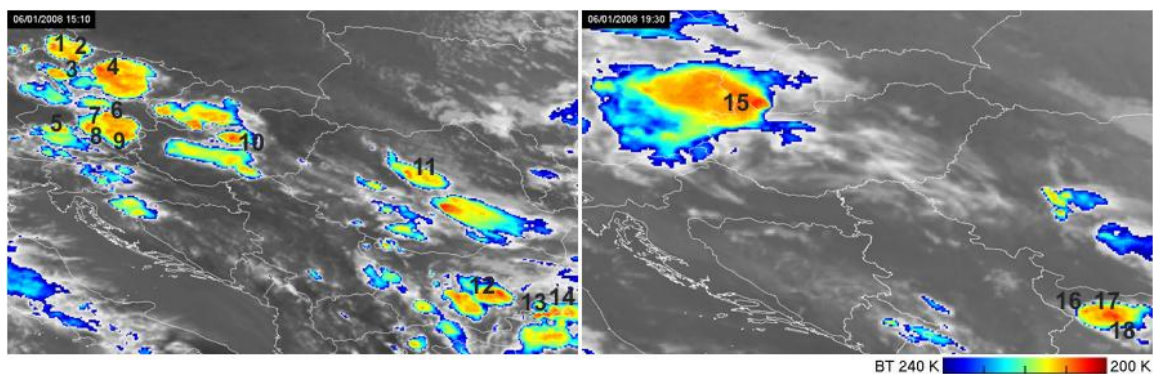
Příloha 4.4: Konvektivní bouře z 29. 5. 2008



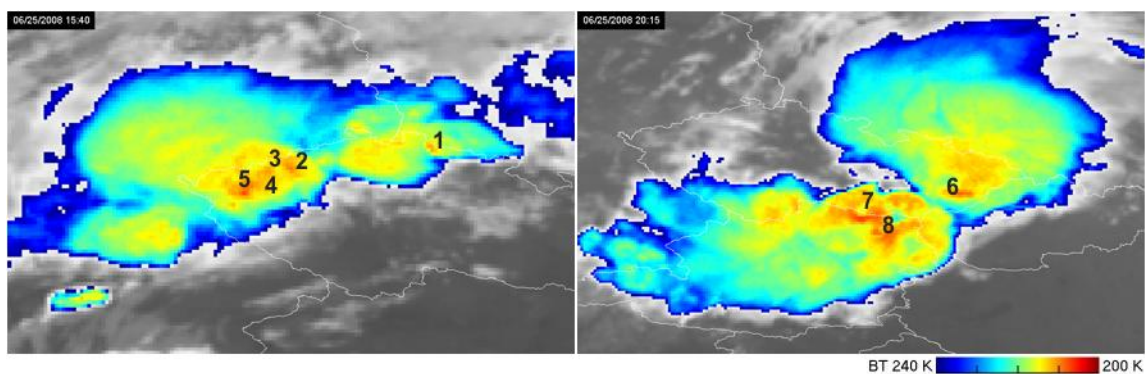
Příloha 4.5: Konvektivní bouře z 31. 5. 2008



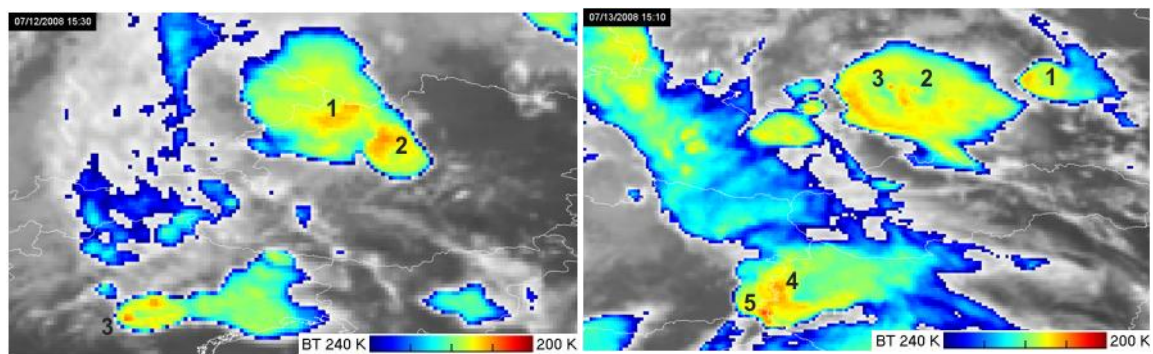
Příloha 4.6: Konvektivní bouře z 1. 6. 2008



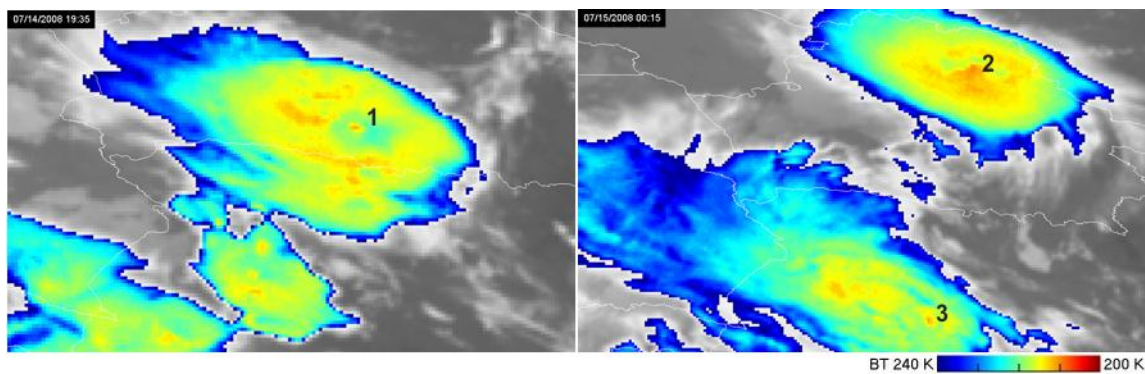
Příloha 4.7: Konvektivní bouře z 25. 6. 2008



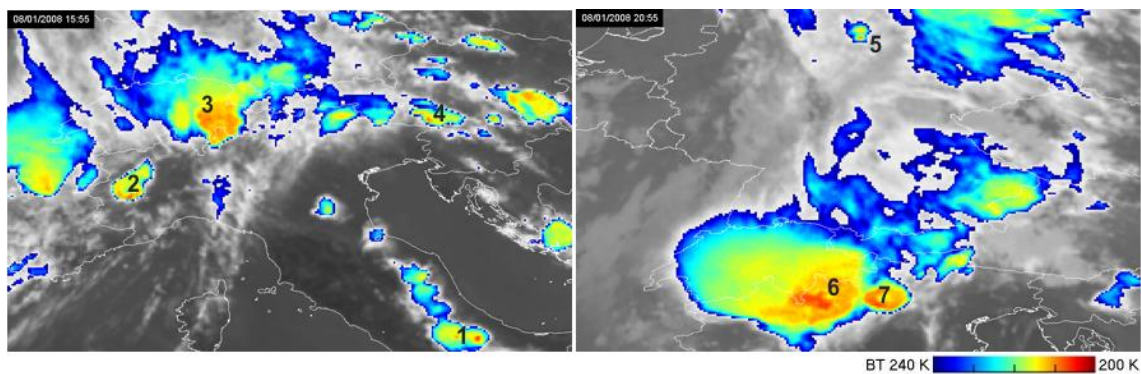
Příloha 4.8 a 4.9: Konvektivní bouře z 12. 7. 2008 a 13. 7. 2008



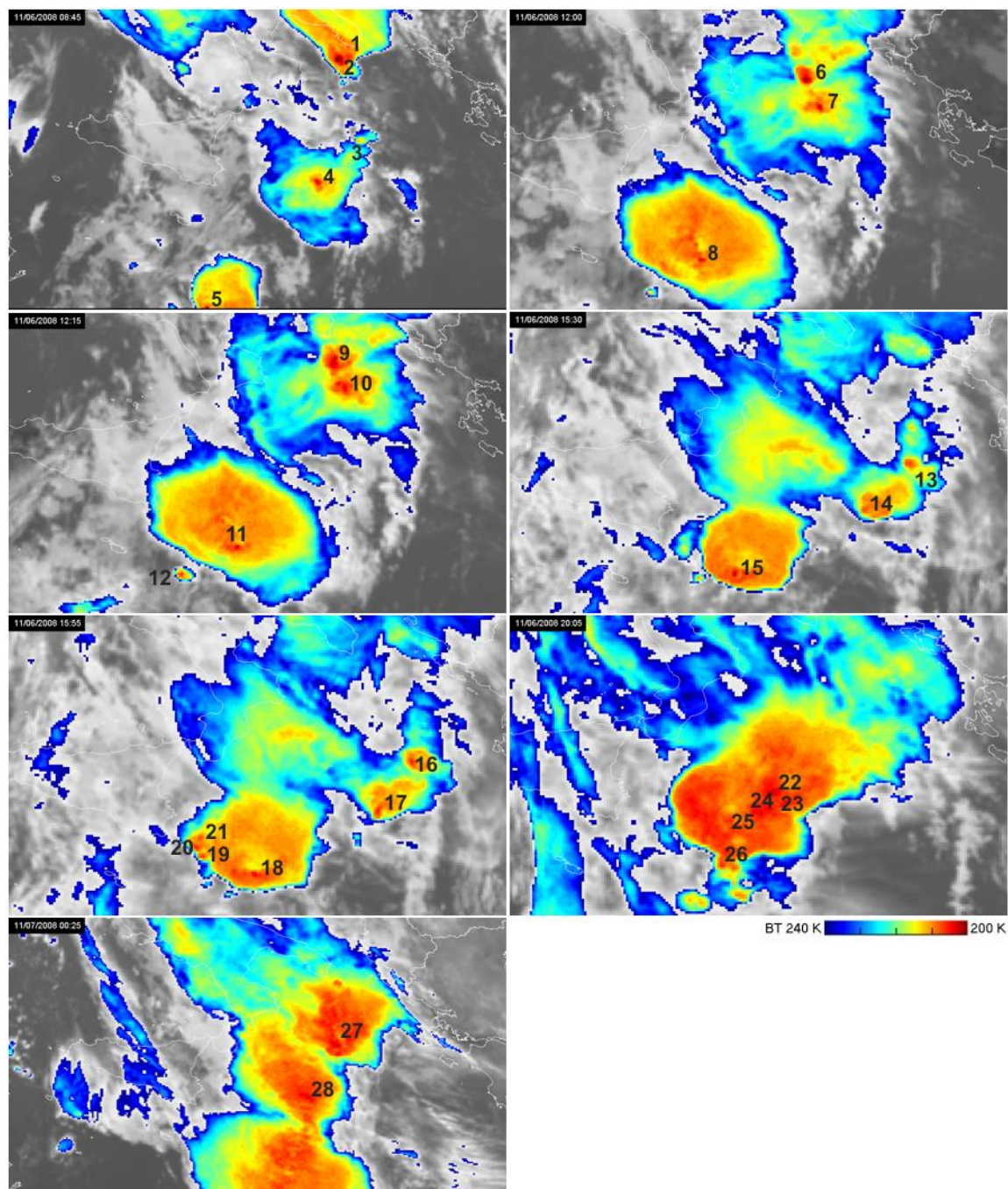
Příloha 4.10: Konvektivní bouře z 15. 7. 2008



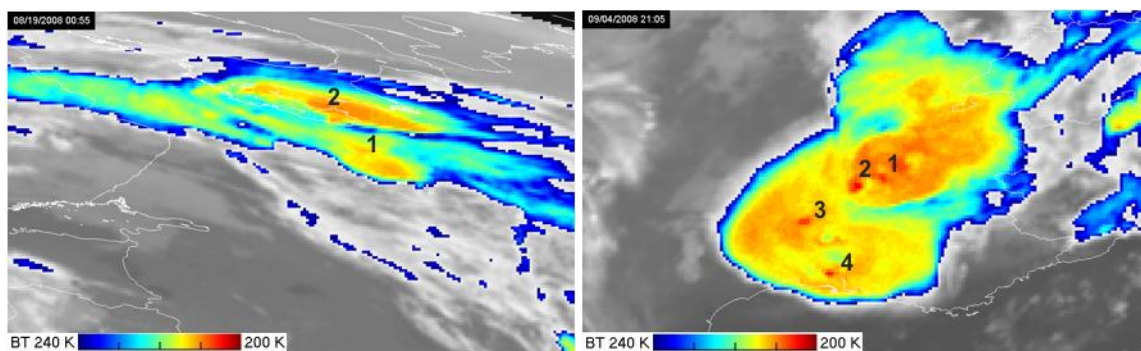
Příloha 4.11: Konvektivní bouře z 1. 8. 2008



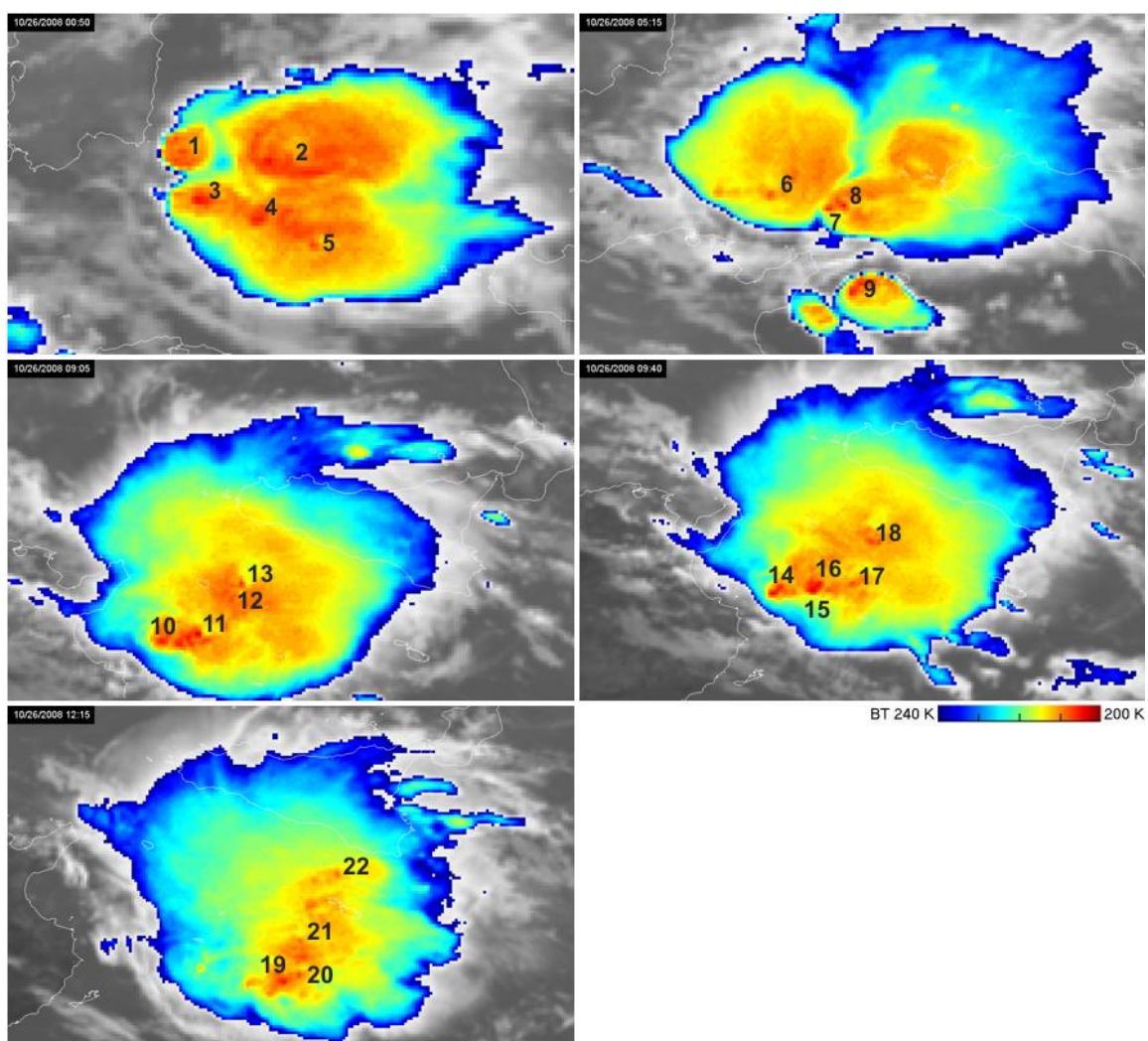
Příloha 4.12: Konvektivní bouře ze 6. 11. 2008



Příloha 4.13 a 4.14: Konvektivní bouře z 20. 8. 2008 a ze 4. 9. 2008



Příloha 4.15: Konvektivní bouře z 26. 10. 2008



Příloha 4.16: Konvektivní bouře z 25. 5. 2009

